

**Análisis Técnico y Económico de Pavimentos con Incorporación de Asfaltos Modificados
con Grano de Caucho Reciclado**



Manuel Andrés Olua Martínez

Edwin Yesid Salamanca González

**Universidad Católica de Colombia
Facultad de Ingeniería
Programa de Especialización en Ingeniería de Pavimentos
Bogotá D.C.
2021**

**Análisis Técnico y Económico de Pavimentos con Incorporación de Asfaltos Modificados
con Grano de Caucho Reciclado**



**Manuel Andrés Olua Martínez
Edwin Yesid Salamanca González**

Trabajo de Grado presentado como requisito para optar el título de
Especialistas en Ingeniería de Pavimentos

Asesor:
PhD. Eduardo José Rueda Cárdenas

**Universidad Católica de Colombia
Facultad de Ingeniería
Programa de Especialización en Ingeniería de Pavimentos
Bogotá D.C.
2021**



Atribución-NoComercial 4.0 Internacional (CC BY-NC 4.0)

This is a human-readable summary of (and not a substitute for) the [license](https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/deed.es). Advertencia.

Usted es libre de:

Compartir — copiar y redistribuir el material en cualquier medio o formato

Adaptar — remezclar, transformar y construir a partir del material

La licencianta no puede revocar estas libertades en tanto usted siga los términos de la licencia

Bajo los siguientes términos:



Atribución — Usted debe dar [crédito de manera adecuada](#), brindar un enlace a la licencia, e [indicar si se han realizado cambios](#). Puede hacerlo en cualquier forma razonable, pero no de forma tal que sugiera que usted o su uso tienen el apoyo de la licencianta.



NoComercial — Usted no puede hacer uso del material con [propósitos comerciales](#).

No hay restricciones adicionales — No puede aplicar términos legales ni [medidas tecnológicas que restrinjan legalmente a otras a hacer cualquier uso permitido por la licencia](#).

<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/deed.es>

Aceptación

Jurado No. 1

Jurado No. 2

Presidente

Bogotá D.C. junio de 2021

Agradecimientos

A Dios por permitirnos culminar este logro tan importante para nuestras vidas, el cual fue de mucha dedicación, sacrificio y entrega, gracias a su bendición ha sido posible terminar exitosamente el posgrado en medio de un tiempo tan difícil para la humanidad.

Nuestros más sinceros agradecimientos a la Universidad y a los docentes que hicieron parte fundamental en la formación como Especialistas en Ingeniería de Pavimentos.

A nuestras familias por el apoyo primordial en nuestras vidas y sobre todas las cosas a los padres y madres que luchan por mantener en pie nuestros hogares.

A nuestro asesor, el Ingeniero Juan Bastidas, por su paciencia, interés y consejos durante este tiempo.

Dedicatoria Manuel

A Dios por darme la fuerza necesaria para terminar el Posgrado, gracias a su bendición ha sido posible culminar de gran manera esta etapa para mi vida profesional.

A mis papás Samuel y Omaira, por brindarme el apoyo desinteresado, su amor, cariño y aliento para salir adelante, fueron el motor para culminar la Especialización.

A mis hermanas Andrea y Glad, por el apoyo y cada palabra de motivación que fue indispensable para alcanzar este logro.

A mis sobrinas Camila y Laurita quienes fueron y serán siempre la inspiración y motivación para salir adelante.

Life in Technicolor, IngLife...

Dedicatoria Edwin

A Dios por la vida y permitir llegar hasta este momento fundamental de mi formación profesional.

A mis papás Julio salamanca y Nelsy González, por ser los pilares de mi vida y por siempre demostrarme su cariño y apoyo sin importar las diferentes circunstancias.

A mi esposa Wendy Chaves que con su amor y cariño fue un apoyo incondicional y me ayudo a mantenerme a pesar de las dificultades que se me pudieran presentar y fue esa voz de aliento en los momentos difíciles.

A mis hermanos y sobrinos por su amor y cariño incondicional los cuales son el motor de mi vida.

Glosario

CBR: “El Ensayo CBR (California Bearing Ratio: Ensayo de Relación de Soporte de California) mide la capacidad del suelo para soportar esfuerzos cortantes y evalúa la calidad del subsuelo en el lecho, la plataforma y lecho pavimentado” (Construmatica, s.f., párr. 1)

Modulo resiliente: “Las deformaciones resilientes o elásticas son inmediatamente reversibles y el plástico comúnmente conocido como plástico permanece en el suelo después de que la causa de la deformación ha desaparecido” (Instituto Mexicano del Transporte, 2000, p. 6).

Subbase y base: “Ambas capas tienen un material granular que generalmente se coloca en el contrapiso para formar una capa de soporte para la base del pavimento asfáltico y la losa como tal” (Alcaldía mayor de Bogotá, 2005, p. 12).

Mezcla asfáltica: “El asfalto de mezcla en caliente se define como una combinación de agregado (incluido el polvo mineral) y aglutinante. La cantidad relativa de aglutinante y agregado determina las propiedades físicas de la mezcla” (Zúñiga, 2015, p. 16).

Modulo dinámico: “Esta es una propiedad mecánica básica en el diseño de pavimentos asfálticos. Esta propiedad determina el comportamiento de respuesta a la deformación de la mezcla bituminosa en función de la temperatura y la carga aplicada” (Delgado, Gómez y Flores, 2017, p. 15).

Fatiga: “Los dos principales mecanismos de falla de las estructuras de piso flexibles son la fatiga y la formación de surcos. La fatiga está relacionada con la respuesta elástica de la estructura y la resistencia a la acumulación vertical de deformaciones permanentes en dirección vertical” (Rondón, Reyes, González y Vásquez, 2015, p. 6).

Carpeta asfáltica: “Es la capa superior de pavimento flexible que proporciona una superficie rodante para los vehículos y está hecha de material rocoso y productos asfálticos” (Salamanca y Godoy, 2013, p. 13).

Ahuellamiento: Este es un tipo de defecto o daño que ocurre en el pavimento de asfalto y consiste en abolladuras que conducen a huellas de vehículos. Entonces, la causa en este caso es el diseño de la construcción o la estructura de piso. (Thenoux y Carrillo, s.f.).

MDC-19: “Conglomerado bituminoso granulado continuo con un tamaño máximo de 19 mm. El tipo INVIAS MDC19 se utiliza comúnmente para la construcción de pavimentos en carreteras con tráfico medio y alto” (CTU, s.f., párr. 1)

MDC-GCR: Esta especificación trata de la incorporación de gránulos de caucho reciclado en mezclas de asfalto como modificadores de asfalto. (Alcaldía mayor de Bogotá, s.f., p. 1).

Capa de rodadura: Es una mezcla de roca y asfalto, y es un tratamiento superficial que no es demasiado grueso porque tiene espesor de pocos centímetros. Los laminados más conocidos o más utilizados son el mortero frío, el riego y el asfalto. (VISE, s.f.).

Agrietamiento por fatiga: “Las grietas de piel de cocodrilo o de fatiga son una serie de grietas interconectadas causadas por los efectos de la fatiga de un pavimento de asfalto expuesto a cargas repetidas o tráfico” (Ministerio de transporte y comunicación, 2013, p. 1).

Deformación unitaria:

Esto se define como un cambio de tamaño por unidad de longitud. Generalmente se expresa en Pascal (Pa) o PSI (libras por pulgada cuadrada). La distorsión no tiene dimensiones y suele

estar representada por /in o cm/cm (Cad Portal, s.f., párr. 2).

Pavimento asfáltico: “La estructura de un pavimento asfáltico que consta de todas las capas o capas colocadas sobre un sustrato preparado” (E-Asfalto, s.f., párr. 3).

Asfalto: “Los minerales negros son de origen natural o se obtienen artificialmente de la destilación del petróleo. Esta mezcla mineral con cal, arena y otras sustancias se utiliza principalmente para pavimentar vías públicas” (Léxico, s.f., párr. 1-2).

Tránsito de diseño: “El análisis final llegará a un número equivalente de ejes que utilizará el pavimento a lo largo de su vida útil, en función del tráfico generado en la cabeza de sus proyecciones” (Londoño y Álvarez, p. 2008, p. 23).

Listado de símbolos

CBR: (Ensayo de Relación de Soporte de California)

MDC19: Mezcla asfáltica con gradación continua de aglomerados bituminosos calientes de alta densidad con agregados de hasta 19 mm.

MDC-GCR: Mezcla asfáltica densa en caliente de gradación con incorporación del Grano de Caucho Reciclado (GCR).

G: Esta es una medida de la resistencia total del material a la deformación cuando se corta repetidamente. Hay dos elementos: elasticidad y viscosidad.

kN/m²: kilonewton / metro cuadrado

AASHTO: (American Association of State Highway and Transportation Officials)

Mr: Módulo resiliente, (MPa).

EN: módulo de la capa analizada, (PSI).

EN+1: módulo la capa subyacente, (PSI).

T: espesor de capa analizada, (pulg).

AIU: Administración, Imprevistos y Utilidad.

ϵ_t : Deformación unitaria por tracción

ϵ_z : Deformación unitaria vertical por compresión

NF: El número de cargas repetidas que provocan fisuras por fatiga

ECA: módulo dinámico de la mezcla, (PSI).

Vb: volumen de asfalto en la mezcla, (%).

Va: volumen de vacíos de aire de la mezcla, (%).

Nz: Carga axial admisible repetida para el control de la vía.

NT: Tránsito de diseño.

Contenido

Introducción	18
1. Planteamiento del problema	20
2. Justificación del Problema	22
3. Objetivos	23
3.1 Objetivo General	23
3.2 Objetivos Específicos	23
4. Estado del Arte	24
5. Marco de Referencia	26
5.1. Asfaltos	27
5.2. Clasificación de los asfaltos	29
5.3. Pavimentos	30
5.4. Grano de caucho reciclado	30
5.5. Métodos de agregación del caucho reciclado a las mezcla de asfalto.	30
5.6. Módulo dinámico	33
5.7. Deformación permanente	34
5.8. Ahuellamiento	34
5.9. Fatiga	35
6. Marco Teórico	36

7.	Marco legal	38
8.	Metodología	40
8.1	Variables de diseño de pavimento	40
8.1.1	Estimación del tránsito de diseño. Para Ponce (2019)	40
8.1.2	Determinación del valor representativo de respuesta de la subrasante.	40
8.1.3	Materiales viales	42
8.2	Análisis estructural	46
8.3	Análisis Económico	49
9.	Resultados	50
9.1	Variables de diseño de pavimento	50
9.1.1	Estimación del tránsito de diseño	50
9.1.2	Determinación del valor representativo de respuesta de la subrasante.	50
9.1.3	Materiales Viales	50
9.2	Análisis estructural	51
9.3	Análisis económico	59
10.	Conclusiones	60
11.	Anexos	62
	Bibliografía	70

Lista de figuras

Figura. 1 Composición química de asfalto	28
Figura. 2 Procedimiento de modificación por la vía húmeda	31
Figura. 3 Procedimiento de modificación por la vía seca.	33
Figura. 4 Evolución del daño por fatiga con el espesor de la capa asfáltica: a) para CBR=5%; b) para CBR=10%; c) para CBR=15%	54
Figura. 5 Evolución del daño por Ahuellamiento con el espesor de la capa asfáltica: a) para CBR=5%; b) para CBR=10%; c) para BR=15%	56
Figura. 6 Evolución del daño por Fatiga con el espesor de la capa asfáltica: a) para CBR=5%; b) para CBR=10%; c) para CBR=15%	58

Lista de tablas

Tabla 1 Categorización de los proyectos según el volumen de tránsito.	40
Tabla 2 Valores de Módulo Resiliente para los diferentes CBR	50
Tabla 3 Valores de Módulos de la Subbase para los diferentes CBR.....	51
Tabla 4 Valores de Módulos de la Base para los diferentes CBR	51
Tabla 5 Espesores de capa de rodadura	51
Tabla 6 Deformaciones a tracción obtenidas en PitraPave	52
Tabla 7 Deformaciones a Compresión obtenidas en PitraPave	52
Tabla 8 Tránsito calculado por el modelo de agrietamiento por fatiga INA	53
Tabla 9 Consumo por fatiga, INA.....	53
Tabla 10 Tránsito calculado por el modelo de Ahuellamiento, INA	55
Tabla 11 Consumo por Ahuellamiento, INA.....	55
Tabla 12 Tránsito calculado a partir de ecuaciones obtenidas de laboratorio	57
Tabla 13 Consumo fatiga, a partir de ecuaciones de laboratorio	57
Tabla 14 Costo de 1 Km de carretera con mezcla asfáltica MDC-19.....	59
Tabla 15 Costo de 1 Km de carretera con mezcla asfáltica MDC-GCR	59

Resumen

Este trabajo se realizó a partir de información existente para el diseño de estructuras del pavimento utilizando una mezcla de asfalto y gránulos de caucho reciclado y una mezcla de asfalto MDC-19, se encontró información como variables de diseño como es la subrasante en donde se plantearon tres valores intentando simular condiciones de suelo en donde sea una subrasante blanda, otra de consistencia media y una subrasante con mejoramiento y a través de correlaciones se obtuvo el módulo resiliente. Para pavimentos y materiales granulares, los módulos se calculan utilizando las fórmulas del Manual de Diseño de Pavimentos Asfálticos del INVIAS y para la mezcla asfáltica a partir de resultados de laboratorio ya existentes se obtuvo la curva maestra o de módulo dinámico a diferentes frecuencias, también se estimó la curva de fatiga, todo con el fin de obtener un parámetro de rigidez con el cual se hizo el diseño y por consiguiente predecir la vida fatiga del pavimento. Para la variable tránsito se tomó un valor promedio considerando una carretera entre un medio y un alto volumen de tránsito.

Después se realizó el respectivo análisis estructural con el software de apoyo PitraPave con el cual se calculó las deformaciones a tracción y a compresión en la fibra inferior de la carpeta asfáltica y en la superficie de la subrasante con la finalidad de hacer la predicción de consumos por ahuellamiento y fatiga.

Para el análisis económico se tomó un tramo de 1 km y se calculó basados en los precios actuales del mercado el costo del pavimento sin tener en cuenta AIU, ya que esto varía dependiendo del proyecto y se hizo un comparativo entre la mezcla asfáltica convencional MDC-19 y la mezcla asfáltica con incorporación de grano de caucho reciclado.

Abstract

In this work, it was carried out obtaining existing information, starting with the design variables such as the subgrade where three values were proposed trying to simulate soil conditions where it is a soft subgrade, another of medium consistency and a subgrade with improvement and through correlations obtained the resilient modulus. For the subbase and granular base materials, the modules were calculated with equations described in the Asphalt Pavement Design Manual for roads with medium and high traffic volumes, and for the asphalt mixture, the master curve was obtained from existing laboratory results. or dynamic modulus at different frequencies, the fatigue curve was also estimated, all in order to obtain a stiffness parameter with which the design was made and therefore predict the fatigue life of the pavement. For the variable traffic, an average value was taken considering a road between a medium and a high volume of traffic.

Afterwards, the respective structural analysis was carried out with the PitraPave support software with which the tensile and compressive deformations were calculated in the lower fiber of the asphalt layer and in the surface of the subgrade in order to make the prediction of consumption by rutting and fatigue.

For the economic analysis, a section of 1 kilometer was taken and the cost of the pavement was calculated based on current market prices without taking into account administration, utilities and contingencies since this varies depending on the project and a comparison was made between the asphalt mix conventional MDC-19 and asphalt mix incorporating recycled rubber grain.

Introducción

En la actualidad existe un enorme problema medioambiental debido al desecho de llantas neumáticas. El problema fundamental con este tipo de residuos es su almacenamiento final debido a que la mayoría de estas se depositan en sitios que no están certificados y ocupan espacio, asimismo, por ser desechos sólidos se deben almacenar, enterrar y en el peor de los casos se incineran. Por otra parte, la acumulación de llantas puede servir como refugio de insectos y aguas lluvias lo cual puede producir enfermedades, de otro modo esta aglomeración también da mayor probabilidad de incendios y origen de gases tóxicos.

La solución que se plantea a este problema desde el campo de la ingeniería civil es la búsqueda de carreteras capaces de incluir estos residuos en la construcción de capas de pavimento, a través de la trituración de las llantas y separación de fibras y acero se obtiene el caucho granular, con este procedimiento se consiguen las diferentes granulometrías para las distintas aplicaciones de este residuo. Las mezclas asfálticas pueden incorporar gran parte del caucho que se encuentra en las llantas desechadas, agregar estas mezclas es una forma de reciclar estos desechos y mejorar las propiedades del piso. Esto lo hace más sensible a las variaciones térmicas, resiste la fatiga y las grietas por envejecimiento y prolonga la vida útil del pavimento y reducir los costos del mantenimiento.

Existen algunas técnicas convencionales de adición del grano de caucho a la mezcla asfáltica. La primera corresponde a la vía seca, donde los agregados son sustituidos por grano de caucho reciclado. La segunda corresponde a la vía húmeda, donde el grano de caucho es adicionado al asfalto en condiciones en caliente. Este segundo procedimiento consiste en la fabricación de un asfalto modificado. Estas técnicas, según la literatura consultada puede mejorar las

características mecánicas de los pavimentos en servicio. Al mismo tiempo, contribuye con a la preservación del medio ambiente al reciclar las llantas neumáticas.

En este contexto, el presente trabajo dentro de la línea investigativa se pretende estudiar un pavimento al cual se le incorpore el caucho granular producto de llantas desechadas dentro de las mezclas asfálticas en caliente, para luego comparar con un pavimento con mezcla asfáltica convencional, asimismo se estudiará el factor económico de ambos pavimentos Se pretende describir “ventajas y desventajas técnicas, económicas y medioambientales obtenidas mediante el uso de gránulos de caucho reciclado para mejorar la mezcla asfáltica” (Díaz y Castro, 2017, p. 8).

1. Planteamiento del problema

Según lo plantean Diaz y Castro (2017) En el planeta tierra los neumáticos están incluidos en el transporte diario, como personas, automóviles, motocicletas y autobuses, y son un elemento importante de la economía porque le permiten viajar por carretera. Los neumáticos son uno de los artículos que más se desechan y lo que es peor no son biodegradables. Los obstáculos que se han presentado al buscar el destino de los neumáticos usados han tenido un aporte significativo a los problemas medioambientales de los últimos tiempos.

El desecho en todo el mundo de llantas anualmente es demasiado alto ocasionando un elevado impacto negativo medioambiental, por ejemplo, se dice que alrededor de 300 millones de neumáticos son desechados en un año en Estados Unidos mientras que “en Brasil anualmente se producen 45 millones de neumáticos de los cuales 30 millones son botados a la basura” (Neto, et al 2003, citado en Rondón, Molano, Tenjo. 2012, p. 15).

Colombia y principalmente su capital presentan grandes inconvenientes porque la mayoría de las llantas son desechadas a botaderos no certificados, lo que genera impactos negativos tanto medioambientales como en contaminación visual, se corre el riesgo de que sean incineradas a cielo abierto lo que genera emisiones de gran impacto de gases tóxicos contaminantes como CO₂, contribuyendo al calentamiento global lo cual trae consigo graves problemas medioambientales.

La infraestructura vial colombiana se encuentra construida mayormente por pavimentos asfálticos los cuales presentan defectos causados por su vida útil reducida, y un grave problema generado por los pavimentos defectuosos es la accidentalidad que se genera, en la mayoría de los casos esta vida útil es reducida por los bajos estándares de calidad con que se construye el pavimento, desde la producción del asfalto hasta la construcción final como tal. Hay carreteras

que presentan altos volúmenes de tránsito y para esto es necesario la construcción de pavimentos con especificaciones mejores en función a su capacidad de carga, para esto es necesario materiales de mejor calidad que ayuden a aumentar la capacidad de carga de los pavimentos.

2. Justificación del Problema

Después del uso en los vehículos las llantas tienen distintos destinos al terminar su periodo de servicio tales como: aprovechamiento energético, arrecifes artificiales, estabilización de taludes, implementación en parques, muros para contención, barreras para pistas de carretas, modificador de asfaltos y/o mezclas asfálticas, etc., los autores Díaz y Castro (2017) afirman que

Desde hace algunos años se ha investigado mucho acerca de la modificación de los asfaltos con caucho granular, y se ha encontrado que además de ayudar a reducir los inconvenientes del medioambiente al reutilizar las llantas desechadas mejoran de una manera notoria las propiedades mecánicas de las mezclas asfálticas, incrementando su vida útil y disminuyendo costos de mantenimiento a lo largo del periodo de diseño (p. 14).

Unas de las razones por las cuales es fundamental reutilizar las llantas neumáticas en pavimentos modificados con caucho granular son que el desecho de estas genera un problema medioambiental significativo. Las llantas son un sitio muy propenso a la incubación de insectos en épocas de lluvias, contaminan visualmente, están expuestas a incendios generando gases tóxicos como CO₂ que afectan el sistema respiratorio y la piel, asimismo la producción de estos gases deteriora el medio ambiente.

3. Objetivos

3.1 Objetivo General

Comparar técnica y económicamente un pavimento con adición de asfalto modificado con caucho granular con un pavimento con mezcla asfáltica MDC-19.

3.2 Objetivos Específicos

- ❖ Recolectar información de caracterizaciones de materiales, curvas maestras y curvas de fatiga de mezclas asfálticas con adición de grano de caucho y mezclas MDC-19. Así como precios de los diferentes materiales empleados para las estructuras de pavimento a estudiar.
- ❖ Verificar mediante el apoyo del software PitraPave que tanto se deforma el pavimento variando los valores de subrasante y espesores de carpeta asfáltica.
- ❖ Especificar que pavimento y bajo que valores de sus variables es más resistente al consumo por fatiga y por ahuellamiento.
- ❖ Determinar en un tramo de 1 kilómetro que pavimento es más costoso dependiendo de los materiales que se utilicen.

4. Estado del Arte

Díaz y Castro (2017), Agregar GCR a las mezclas asfálticas es una alternativa a los problemas que surgen en las propiedades mecánicas de los pavimentos y se ha demostrado que reduce la mano de obra, con varios estudios revisados a nivel mundial. El impacto medioambiental de los neumáticos usados.

En resumen, es importante controlar la purificación de la mezcla manteniendo la proporción óptima de material inerte, asfalto y partículas de caucho reciclado. Esto es para reducir los costos de mantenimiento y lograr mejoras de mezcla, especialmente para cumplir con los beneficios del proyecto (Díaz y Castro, 2017).

Asimismo, diversos estudios han demostrado que la adición de GCR a la mezcla bituminosa en pendientes secas o húmedas mejora proporcionalmente las propiedades del pavimento blando.

Maldonado (2018). Investigar la importancia de agregar GCR a las mezclas asfálticas, los beneficios económicos, mecánicos, ambientales y de desarrollo de esta mezcla modificada ya en la construcción de carreteras.

En conclusión, resulta que Colombia tiene importantes problemas ambientales debido a la inadecuada gestión de disposición de llantas usadas. Se puede decir que no se optimiza el uso de este material y su aplicación en pavimentos asfálticos. Esto se debe principalmente a la falta de una política pública que constituya e incentive el uso de este adhesivo, como el (GCR). Para Maldonado (2018)

Los beneficios económicos de implementar esta tecnología se verán reflejados a largo plazo.

Reemplazar materiales como agregados finos con materiales reciclados extenderá la vida útil del piso y aumentará los intervalos de mantenimiento. Según una encuesta realizada por la Universidad de EAFIT, respecto a la factibilidad de implementar caucho asfáltico, el costo de

implementación de asfalto modificado y concreto mixto (GCR) es aproximadamente del 6% cuando se compara el proceso de fabricación del proceso con el mezclado convencional. Más caro. En comparación con los conglomerados bituminosos tradicionales, pero dependiendo de los parámetros estructurales, el costo total del conglomerado se puede reducir en un 18%. (p. 69).

5. Marco de Referencia

El uso de asfaltos modificados con caucho granular para la construcción de carreteras ha evolucionado en los últimos tiempos en todo el mundo, siendo una gran alternativa para mejorar las condiciones de vida útil de los pavimentos flexibles, encontrando un buen desempeño que les ha permitido prolongar su duración y ajustar los costos de mantenimiento durante su periodo de diseño.

La adición del grano de caucho al asfalto trae consigo un bitumen más rígido y elástico y desde el punto de vista físico el asfalto tiene menor penetración, es decir que es más rígido, tiene mayor punto de ablandamiento con lo que necesita más temperatura para poder realizar el ensayo, es más viscoso y desde el punto de vista reológico tiene más G es decir mayor rigidez y mayor módulo de corte dinámico y tiene menor ángulo de fase, es decir que se hace más elástico como tal. Mientras que dentro de la mezcla asfáltica tiene un asfalto de lámina más gruesa puesto que tiene caucho entonces genera inconvenientes como tal porque se necesitaría más asfalto para recubrir las partículas y por otra parte necesita mayor temperatura para calentar el material para garantizar el recubrimiento de las partículas.

Con respecto al módulo dinámico las diferentes literaturas dicen que disminuye y otras que aumenta, y partiendo desde la definición del módulo dinámico es la relación entre la tensión sobre la deformación elástica, y si la deformación elástica es mayor entonces el módulo es menor lo que trae consigo beneficios en el momento de la aplicación de las solicitaciones ya que el material se deforma más pero asimismo se recupera entonces si se recupera tiene mayor probabilidad de resistir a la fatiga. Desde el punto de vista de los daños en el agrietamiento resiste más número de ciclos, es decir soporta más tránsito, y desde el punto de vista de la

deformación permanente teniendo en cuenta que es un asfalto más rígido es menos susceptible al ahuellamiento.

Debido al grado de avance en la infraestructura vial en Colombia es necesario darle un importante rol a los trabajos de investigación que tienen como objeto el estudio de nuevas tecnologías para mejorar la calidad de vida del ser humano tal como este tipo de pavimentos que garanticen el buen funcionamiento de una carretera. “Entre los beneficios que se obtienen a partir de la modificación de los pavimentos con grano de caucho se encuentran: disminución en la susceptibilidad térmica, mejor comportamiento respecto a la fatiga, aumento de resistencia al envejecimiento, etc.” (Díaz y Castro, 2017, p. 19)

5.1. Asfaltos

Según Velázquez (1977 citado en Díaz y Castro, 2017)

El asfalto es un material muy interesante para los ingenieros porque es un adhesivo fuerte, adhesivo, impermeable y duradero. Es un material plástico que brinda flexibilidad controlable a las mezclas de agregados comúnmente combinados. Además, es muy resistente a la mayoría de los ácidos, álcalis y sales. Es un sólido o semisólido a temperatura ambiente, pero se puede licuar fácilmente mediante la aplicación de calor, la acción de disolventes de diferente volatilidad o por emulsificación. (p. 17).

Propiedades físicas: El asfalto es un material bituminoso semisólido a temperatura ambiente, derivado de hidrocarburos naturales por destilación, que contiene pequeñas cantidades de productos volátiles y tiene propiedades aglutinantes. Este es un material dúctil. Es decir, su comportamiento está directamente relacionado con la temperatura y la frecuencia de aplicación de cargas, con deformaciones elásticas (recuperables) y dúctiles (no recuperables) (Díaz y

Castro, 2017).

Composición química: Los hidrocarburos forman parte del asfalto y forman una solución líquida con un grupo de moléculas de hidrocarburos pesados (asfalto) dispersas en un medio aceitoso ligero (martene) formado por hidrocarburos saturados, resinas y compuestos aromáticos. (Angulo, 2005 citado en Diaz y Castro, 2017). Tal como se evidencia en la Figura 1.

Figura. 1 Composición química del asfalto



Fuente: Espinoza y Voldoso (2014). Estudio de la técnica del reciclado con asfalto espumado en las carreteras la Oroya – Chicrin – Huanuco – Tingo María – Dv. Tocache y Conococha -Yanacancha. Universidad Ricardo palma. Facultad de ingeniería. [en línea] disponible en <https://docplayer.es/71681671-Estudio-de-la-tecnica-del-reciclado-con-asfalto-espumado-en-las-carreteras-la-oroya-chicn-huanuco-tingo-maria-dv-tocache-y-conococha-yanacancha.html>

- **Asfaltenos:** Estas son sustancias que contienen compuestos aromáticos negros o marrones, incluidos elementos químicos como nitrógeno, azufre, carbono y oxígeno. Son compuestos polares (Diaz y Castro, 2017).
- **Maltenos:** son sustancias constituidas principalmente por resinas aromáticas y aceites

saturados, al igual que los asfaltenos muy polares, son compuestos del carbón, hidrógeno y cantidades menores de oxígeno y azufre (Díaz y Castro, 2017).

- **Resinas aromáticas:** consiste en un total de 0-65 componentes de betún, que es un compuesto amarillo o rojo a temperatura ambiente (Díaz y Castro, 2017).
- **Aceites saturados:** son líquidos incoloros que actúan como antioxidantes y repelentes, tienen poca adherencia y provocan la deformación del asfalto en las carreteras (Díaz y Castro, 2017).

5.2. Clasificación de los asfaltos

Para Díaz y Castro (2017) la clasificación de los asfaltos según su aplicación es la siguiente:

- ❖ **Pavimentación:** Mezclas cerradas, Mezclas abiertas, drenantes, base asfáltica.
- ❖ **Riegos:** Imprimación y de liga.
- ❖ **Tratamientos y lechadas:** sellos de arena y tratamientos superficiales.

Clasificación de los asfaltos en pavimentación:

- ❖ **Asfaltos líquidos:** un compuesto a base de asfalto (cemento bituminoso) y un líquido volátil, con la adición de un solvente para reducir la viscosidad del betún a mezclar con áridos.
- ❖ **Cemento asfáltico:** un material de uso común, un material viscoso que es duro a bajas temperaturas (menos de cero) y líquido a altas temperaturas, y etapas de destilación del aceite (Díaz y Castro, 2017).
- ❖ **Emulsiones asfálticas:** Se trata de un sistema heterogéneo que consta de dos fases inmiscibles, como el asfalto y el agua
- ❖ **Reología del asfalto:** Es una ciencia que estudia la deformación y el flujo de la materia. Es importante conocer la investigación en reología del asfalto. El betún, de hecho,

correlaciona la estructura física de sus componentes con su composición química para obtener un flujo característico (Díaz y Castro, 2017).

5.3. Pavimentos

Los autores Díaz y Castro (2017) afirman que un pavimento es una capa hecha de uno o más materiales que se coloca sobre un terreno plano y luego se comprime, lo que aumenta la resistencia y ayuda al vehículo a pasar. Nuestras aceras de estudio se hacen flexibles combinando asfalto mejorado con gránulos de caucho.

5.4. Grano de caucho reciclado

Los gránulos de caucho reciclado son materiales fabricados a partir de neumáticos desechados y, a menudo, se envían a vertederos, vertederos no certificados o vertederos de superficie que causan daños ambientales graves.

Este producto se obtiene de la trituración de neumáticos, que produce una variedad de tamaños de partículas. Se utiliza en muchos tipos de construcción civil, como relleno, material de contención, zonas verdes y modificadores de mezcla de asfalto. (Díaz y Castro, 2017).

Varias revisiones de trabajos de investigación realizados sobre este tema han encontrado que el caucho granular se ablanda y se hincha cuando reacciona con el asfalto. Su acción sobre el compuesto produce un betún más espeso, lo que lo hace más resistente al envejecimiento y la oxidación (Díaz y Castro, 2017).

5.5. Métodos de adición del grano de caucho reciclado a las mezclas asfálticas.

Para Díaz y Castro (2017)

El rendimiento de los gránulos de caucho añadidos al pavimento proporciona ventajas físicas y mecánicas. De los cuatro métodos anteriores, los dos más utilizados son los dos que puede

agregar. El suelo tiene características que se suman al revestimiento del suelo (p. 29).

❖ **Vía Húmeda:** Esta carretera produce un producto comúnmente conocido como "asfalto modificado con caucho" o simplemente "asfalto de caucho". Este proceso puede aumentar la viscosidad del hormigón asfáltico para darle ciertas propiedades. La ductilidad de esta mezcla disminuye a altas temperaturas. Esta es una ventaja para evitar la formación de surcos. A bajas temperaturas, la ductilidad del composite aumenta, ayudando a reducir posibles fisuras por fatiga.

Así, en los resultados esperados de la mezcla "Asfalto Caucho" es necesario considerar factores muy importantes, como tamaño de partícula de caucho, consistencia, proporciones, tipo de cemento bituminoso, grado de calor y tiempo. Mezcla, etc.

Figura. 2 Procedimiento de modificación por la vía húmeda



Fuente: Díaz y Castro (2017). Implementación del grano de caucho reciclado (GCR) Proveniente de llantas usadas para mejorar las mezclas Asfálticas y garantizar pavimentos sostenibles en Bogotá. Universidad Santo

Tomas. [en línea] disponible en <http://ligante-asfaltico.blogspot.com/p/lantas-usadas-en-pavimentos.html>

En la Figura 2 se describe el procedimiento de modificación por la vía húmeda:

Consiste en un tanque de concreto asfáltico, un tanque de caucho granulado mixto y una serie infinita de gusanos, asegurando la circulación de la mezcla y la reacción óptima entre estos dos materiales en 5 y 60 minutos, Los agregados de roca pueden calentarse para formar una nueva mezcla con concreto asfáltico modificado y luego transportarse al sitio. Durante este transporte, se deben mantener ciertas temperaturas entre 160 ° C y 190 ° C para evitar problemas de manipulación de materiales en el lugar y pérdida de propiedades mecánicas (Díaz y Castro, 2017, p. 30).

❖ **Vía Seca:** En el método seco, a diferencia del método húmedo, los gránulos de caucho se mezclan con el agregado antes de agregar el cemento bituminoso a la mezcla. Este tipo de mezcla tiene ciertas desventajas técnicas. Para Díaz y Castro (2017)

La falta de estándares de calidad y desempeño inconsistentes ha creado desconfianza en su uso. Así que siempre prefiera la vía húmeda. La incorporación de partículas de caucho de esta manera también requiere más betún para cubrir el agregado (p. 33).

Figura. 3 Procedimiento de modificación por la vía seca.



Fuente: Diaz y Castro (2017). Implementación del grano de caucho reciclado (GCR) Proveniente de llantas usadas para mejorar las mezclas Asfálticas y garantizar pavimentos sostenibles en Bogotá. Universidad Santo Tomas. [en línea] disponible en <http://ligante-asfaltico.blogspot.com/p/llantas-usadas-en-pavimentos.html>

En este proceso, los gránulos de caucho mueven una pequeña porción del agregado (1-3 del peso total del agregado), como se muestra en la Figura 3. Esta aplicación se realiza justo antes de agregar agregado. Cemento bituminoso en la mezcla solo si el agregado requiere una cierta temperatura. “Este proceso no requiere un dispositivo de mezcla especial ya que el caucho granulado se mezcla directamente con los gránulos. En algunos casos, una porción más pequeña de los gránulos de caucho entra para ajustar el asfalto. (Diaz y Castro, 2017, p. 33).

5.6. Módulo dinámico

En este apartado, Diaz y Castro (2017) afirman que

El módulo dinámico es el valor absoluto del módulo complejo y determina la elasticidad de un material con viscosidad lineal bajo carga. Especifica la relación entre tensión y deformación. En esta prueba, una muestra de hormigón bituminoso de 15 cm de diámetro y

15-20 cm de altura se sometió a compresión axial no reforzada. A esta muestra se le aplica una serie de cargas a diferentes frecuencias (1, .10 y 16 Hz) con diferentes temperaturas (5 ° C, 25 ° C y 0 ° C). Las cargas a diferentes frecuencias y temperaturas dan como resultado tensiones y deformaciones axiales recuperables. Cuando estas dos relaciones son de forma dinámica (p. 34).

5.7. Deformación permanente

Según Diaz y Castro (2017) en su investigación afirman que

Se utiliza principalmente para analizar el hundimiento y deformación permanente de mezclas asfálticas. Esta prueba incluye el movimiento lineal de una rueda de caucho macizo de 20 mm de espesor y 50 mm de ancho. La frecuencia de este movimiento es de 2 rpm y la presión de contacto es de 900 KN / m². La deformación causada por esta rueda en la muestra se mide cada pocas horas. Además, gestiona una temperatura controlada de 60 ° C (que está lejos de la realidad cuando se trata de temperaturas controladas). La muestra tiene un tamaño de 30 x 30 cm y un grosor de 5 cm. (p. 35).

5.8. Ahuellamiento

El ahuellamiento según Diaz y Castro (2017)

Esto se debe a la deformación permanente de una de las capas del pavimento o cimentación y suele producirse por la consolidación o desplazamiento lateral del material debido a las cargas del tráfico. Las causas del ahuellamiento son las siguientes. Diseño inadecuado de la mezcla de asfalto y concreto, exceso de asfalto, ligantes muy blandos, compresión inadecuada durante la construcción o desgaste de las ruedas abrasivas. Una ranura fuerte puede provocar daños

estructurales graves. El ensayo de deformación plástica se realiza con materiales originarios del Reino Unido, como exige la norma INV. E756 "Resistencia a la deformación plástica de mezclas asfálticas mediante pistas de ensayo de laboratorio". El dispositivo consta de una cabina controlada para mantener una temperatura constante de 601°C. Se aplica una presión de 900 kN / m² a la muestra cuando la rueda de goma pasa un total de 50 - 0 veces. (p. 36).

5.9. Fatiga

En el interior, el daño estructural del pavimento es la fatiga, que se debe principalmente a los efectos del tráfico. La rotura del pavimento estructural suele ocurrir cuando los materiales que componen la estructura se agrietan en el fondo de la capa de asfalto con deformación por tracción cuando se cargan repetidamente por la acción del tráfico. La fatiga ocurre cuando los materiales que componen el concreto asfáltico están estructuralmente agrietados y la base de cada capa se deforma. Los fenómenos que se producen en la carretera durante la conducción son los que se evalúan en el laboratorio mediante las llamadas pruebas de fatiga. Grietas en el material cuando se realizan ensayos de laboratorio sobre la muestra del material con respecto a la respuesta recuperable del pavimento a cargas dinámicas. (Carreño y Reyes. 2015 citado en Diaz y Castro, 2017, p. 36).

6. Marco Teórico

Para Diaz y Castro (2017, citado en Agudelo y Martínez, 2019)

Los estudios realizados en conglomerados bituminosos modificados por GCR han demostrado que existen varios factores que alteran las propiedades mecánicas del conglomerado. Algunos de los factores que emergen son la temperatura de reacción del asfalto y el GCR, el tamaño y distribución granulométrica del árido, la adición de aditivos y el uso de diferentes técnicas para el reciclaje de pavimentos. Una revisión de investigaciones clave ha demostrado que la incorporación de GCR en mezclas asfálticas tradicionales, tanto húmedas como secas, mejora significativamente las propiedades mecánicas de los pavimentos resilientes (p. 29).

Ramírez (2016 citado en Agudelo y Martínez, 2019) afirma que

El valor del agregado bituminoso que contiene GCR aumenta en comparación con el agregado bituminoso convencional, con 1 GCR aumentando en un 26% y neumáticos secos en un 2% aumentando en un 2% para los neumáticos envejecidos. La mezcla de asfalto se agrega en seco o el aglutinante se modifica en húmedo. Asimismo, el uso de GCR reduce la contaminación ambiental al utilizar el GCR de neumáticos usados y proporciona un uso final respetuoso con el medio ambiente. (p. 29)

El caucho granulado reciclado se produce triturando neumáticos de desecho y mezclándolos con asfalto modificado. Al agregar este material, se aumenta la elasticidad del asfalto y no se produce agrietamiento, por lo que se puede mejorar la resistencia a la fatiga. El caucho confiere la propiedad de que la estructura no termina en estado plástico.

La fatiga del piso es un fenómeno en el que la carga repetida se agrieta debido a fuerzas de corte y tracción excesivas y el material pierde su resistencia cuando se somete a cargas repetidas que

varían con el tiempo. Este fenómeno está relacionado con la disminución de la resistencia del material cuando se aplica tensión dinámica al material. Para los autores Delbono y Rebollo (2017)

Las ranuras son defectos obvios en el pavimento de asfalto causados por cargas de tráfico repetidas. Consiste en una acumulación de deformaciones longitudinales permanentes que se producen en todas las capas estructurales de la vía que corresponden a la huella de tráfico, acortando la vida útil de la vía y presentando un riesgo importante para el tráfico (p. 1).

7. Marco legal

La presente investigación se hará bajo los modelos establecidos dentro del Acuerdo No 242 del 23 de septiembre del año 2016 aprobado por el Consejo Superior de la Universidad Católica de Colombia, de tal manera que esta sea una muestra clara de la investigación que es realizada en la institución.

La línea de investigación institucional que engloba de mejor manera el objetivo de esta investigación se denomina **Materiales**. Claramente, el análisis actual de este trabajo de grado se encuentra enmarcado en este campo de investigación, debido a que se estudiará técnica y económicamente un pavimento al cual se le incorpore una mezcla asfáltica modificada con grano de caucho y se hará un análisis comparativo con respecto a un pavimento construido con una mezcla asfáltica en caliente convencional.

Para la realización de la presente investigación, Agudelo y Martínez (2019) consideraron los siguientes marcos legales de referencia:

- ❖ Decreto 442 del 2015 – “Por el cual crean el Programa de aprovechamiento y/o valorización de llantas usadas en el Distrito Capital y se adoptan otras disposiciones” (secretaría de ambiente de Bogotá).
- ❖ Decreto 265 del 2016 - “Por medio de cual modifican el Decreto Distrital 442 de 2015 y se adoptan otras disposiciones” (secretaría de ambiente de Bogotá).
- ❖ Resolución. 6981 diciembre 27 de 2011 - "Por la cual se dictan lineamientos para el aprovechamiento de llantas y neumáticos usados, y llantas no conforme en el Distrito Capital" (IDU).
- ❖ Artículo 413 – 13 “Suministro de cemento asfáltico modificado con grano de caucho reciclado” (INVIAS).

- ❖ Artículo 467 – 13 “Mezclas asfálticas caliente con asfalto modificado con grano de caucho reciclado” (INVIAS).
- ❖ ASTM D 4123-82(1995) “Método de prueba estándar para la prueba de tensión indirecta para el módulo resiliente de mezclas bituminosas” (p. 30).

8. Metodología

La metodología de la investigación se divide en tres grandes etapas: (I) Estimación de las variables de diseño del pavimento. (II) Análisis estructural de los pavimentos propuestos. (III) Análisis económico de las estructuras de pavimento propuestas.

8.1 Variables de diseño de pavimento

8.1.1 Estimación del tránsito de diseño. Para Ponce (2019)

El tránsito vehicular es una de las variables que se consideran para el análisis estructural y diseño de las estructuras de pavimento. Su estimación adecuada resulta fundamental para poder concebir estructuras que sean capaces de ofrecer niveles de desempeño acordes con la durabilidad prevista por el diseñador. (p. 5)

En Colombia se manejan tres niveles de tránsito: bajo, medio y alto, alto es por encima de 5.000.000 de ejes equivalentes de 80 kN, entonces se toma este NT ya que es un valor promedio entre nivel de tránsito medio y alto, entre NT2 y NT3, entre categoría media y alta de un proyecto.

Tabla 1 *Categorización de los proyectos según el volumen de tránsito.*

Categoría del proyecto	Categoría del tránsito	Nivel jerárquico de la información
Media	NT2 Entre 0.5 y 5 millones de ejes equivalentes de 80kN en el carril de diseño	Nivel 2 o 3
Alta	NT3 (Más de 5 millones de ejes equivalentes de 80kN en el carril de diseño)	Nivel 1 o 2

Fuente: Manual de Diseño de Pavimentos Asfálticos para vías de medios y altos volúmenes de tránsito. [en línea] disponible en <https://pdfcoffee.com/manual-de-pavimentos-medios-y-altos-volumenes-agosto-2017pdf-2-pdf-free.html>

8.1.2 Determinación del valor representativo de respuesta de la subrasante. Según el Manual de diseño de pavimentos Asfálticos en Vías con Medios y Altos Volúmenes de

Tránsito

El estudio del suelo para la fundación de la estructura de un pavimento o subrasante resulta fundamental para poder calificar su capacidad mecánica y su estabilidad volumétrica frente a los cambios de humedad en un tramo de carretera definido como homogéneo. La evaluación y la calificación de la subrasante deberán estar ligadas a la confiabilidad requerida por la categoría o importancia definida para la vía y acorde con el método utilizado para el diseño de la estructura de pavimento. (p. 79).

Para la presente investigación se tomaron tres valores de CBR, intentando simular tres condiciones de suelo: una subrasante blanda, una subrasante de consistencia media y una subrasante con mejoramiento, 5, 10 y 15% respectivamente. A partir de estos valores a través de correlaciones se obtuvo el módulo resiliente de la subrasante.

La expresión para estimar el módulo resiliente en función del CBR, es la expresión recomendada en la guía *Mechanistic-Empirical Pavement Design Guide*, (AASHTO), que guarda correspondencia con la expresión determinada en el Laboratorio de Transporte e Investigación de Carreteras de Reino Unido – TRRL –, propuesta inicialmente por Powel *et al.* Para ser aplicada a suelos con valores de CBR entre 2 y 12%

$$M_r = 17.6 * (CBR)^{0.64}, \quad (Mr \text{ en MPa})$$

Donde:

M_r : Módulo resiliente, (MPa).

CBR : relación de soporte de California (CBR) del suelo de subrasante, expresada en %.

Para los suelos con valores de CBR entre 12 y 80%, se recomienda la siguiente expresión del

Laboratorio de Transporte e Investigación de Carreteras del Reino Unido.

$$Mr = 22.1 * (CBR)^{0.55}, \quad (Mr \text{ en MPa})$$

Donde:

M_r : Módulo resiliente, (MPa).

CBR : relación de soporte de California (CBR) del suelo de subrasante, expresada en %.

8.1.3 Materiales viales

Capas granulares

Las capas granulares en los pavimentos deben ser construidas con materiales resultantes de procesos de trituración de rocas sanas y de mezclas de suelos granulares de calidad confirmada.

Se puede estimar el valor del módulo resiliente que desarrolla un material granular según las siguientes expresiones descritas en el capítulo 5.5 del Manual de Diseño de Pavimentos

Asfálticos en vías con medios y altos volúmenes de tránsito:

Subbase granular:

$$E_N = E_{N+1} * [1 + 7.18 * \log(t) - 1.56 * \log(E_{N+1}) * \log(t)]$$

Base granular:

$$E_N = E_{N+1} * [1 + 10.52 * \log(t) - 2.10 * \log(E_{N+1}) * \log(t)]$$

Donde:

E_N : módulo de la capa analizada, (PSI).

E_{N+1} : módulo de la capa subyacente, (PSI).

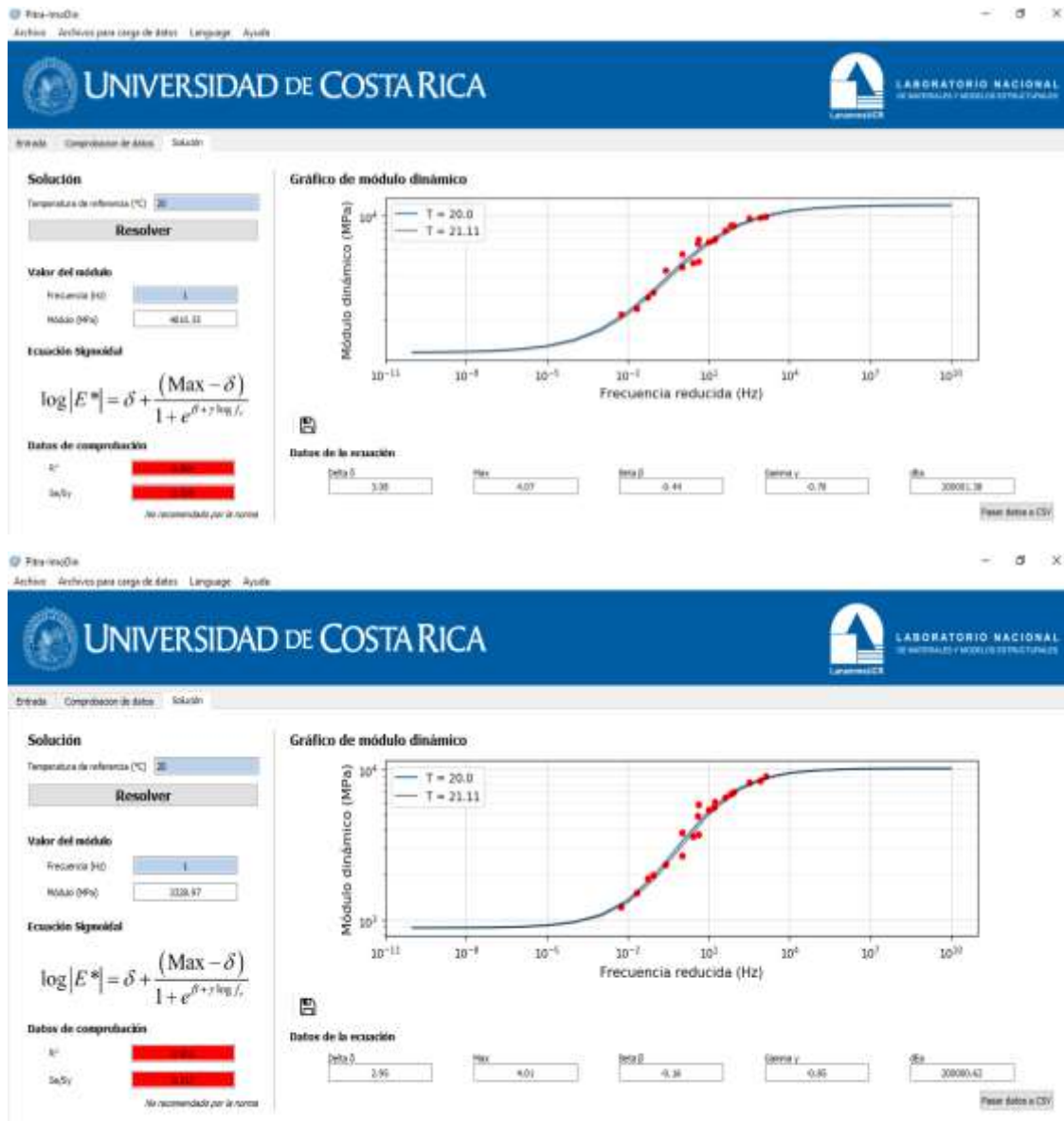
t : espesor de la capa analizada, (pulg).

Mezcla asfáltica

A partir de resultados de laboratorio fueron obtenidas las curvas del módulo dinámico a diferentes frecuencias y la curva de fatiga con el fin de obtener un parámetro de rigidez para hacer el diseño y predecir la vida fatiga del pavimento.

❖ Módulo dinámico:

Fig. 4 Módulo Dinámico de Mezcla Asfáltica



Mezcla MDC-19

Tabla 2 Módulo para Mezcla MDC-19

fr (Hz)	Log (E*)	E*
0.0001	3.17	1464
0.001	3.24	1730
0.01	3.35	2260
0.1	3.51	3243
1	3.68	4810
10	3.83	6762
100	3.93	8596
1000	4.00	9946
10000	4.03	10782
100000	4.05	11249

Fuente: elaboración propia

Mezcla MDC-GCR

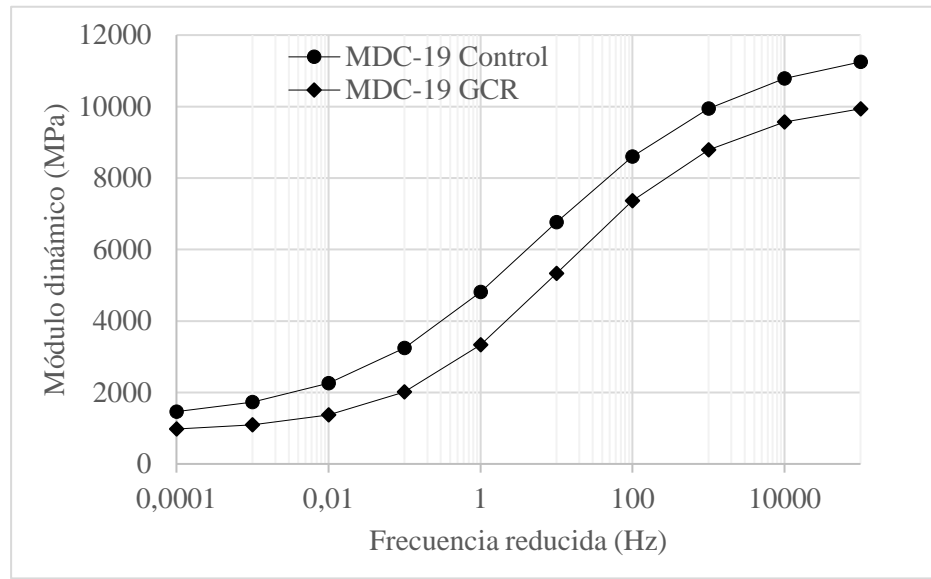
Tabla 3 Módulo para Mezcla MDC-GCR

fr (Hz)	Log (E*)	E*
0.0001	2.99	977
0.001	3.04	1094
0.01	3.14	1371
0.1	3.30	2014
1	3.52	3329
10	3.73	5333
100	3.87	7366
1000	3.94	8788
10000	3.98	9565
100000	4.00	9937

Fuente: elaboración propia

Y se puede visualizar en la siguiente figura 5:

Fig. 5 Módulo Dinámico VS Frecuencia reducida



Fuente: elaboración propia

En consecuencia, los módulos de las mezclas asfálticas son:

$$E_{MDC-19} = 6762 \text{ MPa}$$

$$E_{MDC-GCR} = 5333 \text{ MPa}$$

❖ Curva fatiga:

Tabla 4 Control de Fatiga

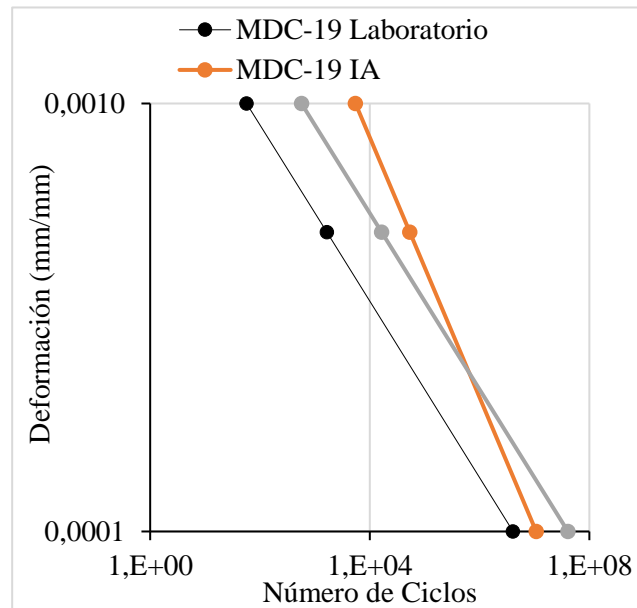
Control de Fatiga			
et	1.00E-03	5.00E-04	1.00E-04
M	0.089	0.089	0.089
Vb (%)	12	12	12
Va (%)	5	5	5
C	1.23	1.23	1.23
Eca (psi)	995104	995104	995104
k1	18.4	18.4	18.4
k2	3.291	3.291	3.291
k3	0.854	0.854	0.854
N adm fatiga	5.50E+03	5.38E+04	1.07E+07

Mezcla	Módulo	e6
MDC-19	$\varepsilon = 0.0023 \cdot N^{-0.206}$	1.34E-04
MDC-GCR	$\varepsilon = 0.0058 \cdot N^{-0.265}$	1.49E-04

Nivel de deformación	Mezcla			FC
	MDC-19 Laboratorio	MDC-19 IA	MDC-19 Lab*FC	
1.00E-03	5.70E+01	5.50E+03	5.70E+02	-95.41
5.00E-04	1.65E+03	5.38E+04	1.65E+04	-31.62
1.00E-04	4.08E+06	1.07E+07	4.08E+07	-1.63

Fuente: elaboración propia

Fig. 6 Deformación en escala logarítmica



Fuente: elaboración propia

En ese orden de ideas se obtienen las siguientes ecuaciones de laboratorio:

$$\varepsilon = 0.0023 \cdot N^{-0.206}, \text{ para la mezcla MDC-19}$$

$$\varepsilon = 0.0058 \cdot N^{-0.265}, \text{ para la mezcla MDC-GCR}$$

8.2 Análisis estructural

Se plantearon tres espesores de carpeta asfáltica: 7.5, 10.0 y 12.5 centímetros, y con los tres valores de CBR para cada mezcla asfáltica resultaron nueve estructuras propuestas de pavimento a analizar las deformaciones en la fibra inferior de la carpeta a tracción y en la fibra superior de

la subrasante a compresión a través del software de apoyo PitraPave, todo esto para hacer la predicción de los consumos por fatiga y ahuellamiento, con las siguientes ecuaciones de desempeño que se encuentran en el ítem 6.7.2 del Manual de Diseño de Pavimentos Asfálticos en vías con medios y altos volúmenes de tránsito (2018), los Modelos de comportamiento del Instituto Norteamericano del Asfalto.

El método del Instituto Norteamericano del Asfalto – Asphalt Institute –, establece como criterios básicos para el diseño estructural, el control del agrietamiento de las capas asfálticas y el ahuellamiento de la subrasante, para lo cual utiliza la determinación de las siguientes solicitaciones:

- a) **Deformación unitaria por tracción ϵ_t** , en la fibra inferior de las capas asfálticas para el control de agrietamiento.
- b) **Deformación unitaria vertical por compresión ϵ_z** , en la fibra superior de la subrasante para el control de la deformación permanente por ahuellamiento.

Las anteriores deformaciones se calculan mediante el uso del software de apoyo PitraPave para las diferentes estructuras de pavimento propuestas ante los tres valores de CBR, los tres espesores de carpeta asfáltica y los módulos de las dos mezclas asfálticas, siendo en total 18 estructuras propuestas a analizar.

Modelo de Agrietamiento por fatiga del Instituto del Asfalto

$$N_f = (0.00432 * K_1 * C) * \left(\frac{1}{\epsilon_t}\right)^{K_2} * \left(\frac{1}{E_{CA}}\right)^{K_3}$$

$$C = 10^M$$

$$M = 4.84 * \left(\frac{V_b}{V_b + V_a} - 0.6875\right)$$

Donde:

N_f : número de repeticiones de carga para causar el agrietamiento por fatiga.

E_{CA} : módulo dinámico de la mezcla asfáltica, (PSI).

V_b : volumen de asfalto efectivo de la mezcla, (%).

V_a : volumen de vacíos con aire en la mezcla, (%).

ϵ_t : deformación unitaria máxima por tracción en la fibra inferior de la capa asfáltica del modelo de análisis.

K_1 : factor que sirve para considerar las diferencias entre las condiciones de campo y de laboratorio =18.4.

K_1 : 3.291.

K_1 : 0.854.

Modelo de Ahuellamiento del Instituto del Asfalto

$$N_z = 1.365 * 10^{-9} * (\epsilon_z)^{-4.477}$$

Donde:

N_z : número de repeticiones de carga por eje admisibles para el control del ahuellamiento.

ϵ_z : deformación unitaria vertical por compresión de la subrasante del modelo de análisis.

Cálculo del daño o consumo

$$Consumo = \left(\frac{NT}{\epsilon} \right) * 100$$

Donde:

Consumo: en porcentaje.

NT: Tránsito de diseño.

ϵ : Deformación a tracción o compresión, según se requiera analizar.

8.3 Análisis Económico

Para este análisis se realizó una cotización a Incominería, una empresa productora de mezclas asfálticas y materiales granulares, con lo cual se estimó que pavimento tiene costos más elevados tomando como tramo de estudio un kilómetro de carretera de dos carriles de 3.50 m cada uno, el análisis se hizo para un pavimento con mezcla asfáltica MDC-19 y para un pavimento con mezcla asfáltica con la incorporación de grano de caucho reciclado MDC-GCR.

9. Resultados

9.1 Variables de diseño de pavimento

9.1.1 Estimación del tránsito de diseño

$NT = 5.000.000$ de ejes equivalentes de 80 KN.

9.1.2 Determinación del valor representativo de respuesta de la subrasante. En la tabla 5, se evidencian los valores de módulos obtenidos mediante las ecuaciones de la guía *Mechanistic-Empirical Pavement Design Guide*, (AASHTO), para los diferentes valores de CBR. El valor del módulo aumenta a medida que se incrementa el CBR.

Tabla 5 Valores de Módulo Resiliente para los diferentes CBR

Subrasante			
VALOR CBR (%)	5	10	15
MÓDULO RESILIENTE (MPa)	49.3	76.8	98.0
MÓDULO RESILIENTE (PSI)	7150.48	11142.80	14214.26

Fuente: elaboración propia

9.1.3 Materiales Viales

Capas granulares

En las tablas 6 y 7 se muestran los valores obtenidos de Módulo mediante las expresiones descritas en el capítulo 5.5 del Manual de Diseño de Pavimentos Asfálticos en vías con medios y altos volúmenes de tránsito. El valor del módulo de las capas granulares aumenta a medida que se incrementa el CBR.

Tabla 6 Valores de Módulos de la Subbase para los diferentes CBR

Subbase			
VALOR CBR (%)	5	10	15
MÓDULO En (MPa)	111.0	148.2	171.7
MÓDULO En (PSI)	16100.1	21498.2	24910.2
ESPESOR (Pulg)	11.8	11.8	11.8
ESPESOR (cm)	30	30	30

Fuente: elaboración propia

Tabla 7 Valores de Módulos de la Base para los diferentes CBR

Base			
VALOR CBR (%)	5	10	15
MÓDULO En (MPa)	278.7	337.1	369.9
MÓDULO En (PSI)	40422.3	48894.5	53655.3
ESPESOR (Pulg)	7.9	7.9	7.9
ESPESOR (cm)	20	20	20

Fuente: elaboración propia

Capa de rodadura

En la tabla 8 se evidencian los tres espesores de capa de rodadura con los que se realizó la presente investigación, tres valores de espesor característicos en pavimentos.

Tabla 8 Espesores de capa de rodadura

Capa de rodadura			
ESPESOR (cm)	7.5	10	12.5

Fuente: elaboración propia

9.2 Análisis estructural

Con ayuda del software PitraPave se realizó el análisis para las 18 estructuras de pavimento propuesta se obtienen, en la tabla 9 las deformaciones en la fibra inferior de la carpeta a tracción y en la tabla 10 se evidencian las deformaciones en la fibra superior de la subrasante a compresión.

Tabla 9 *Deformaciones a tracción obtenidas en PitraPave*

Deformación a tracción						
ESPESOR	MDC 19			MDC GCR		
	CBR			CBR		
	5	10	15	5	10	15
7.5	1.97.E-04	1.74.E-04	1.64.E-04	2.18.E-04	1.92.E-04	1.86.E-04
10	1.63.E-04	1.45.E-04	1.37.E-04	1.83.E-04	1.63.E-04	1.54.E-04
12.5	1.34.E-04	1.21.E-04	1.14.E-04	1.50.E-04	1.37.E-04	1.29.E-04

Fuente: elaboración propia

Tabla 10 *Deformaciones a Compresión obtenidas en PitraPave*

Deformación a compresión						
ESPESOR	MDC 19			MDC GCR		
	CBR			CBR		
	5	10	15	5	10	15
7.5	3.82.E-04	2.82.E-04	2.39.E-04	3.95.E-04	2.90.E-04	2.46.E-04
10	3.17.E-04	2.38.E-04	2.03.E-04	3.33.E-04	2.48.E-04	2.12.E-04
12.5	2.63.E-04	2.00.E-04	1.73.E-04	2.79.E-04	2.12.E-04	1.82.E-04

Fuente: elaboración propia

En los anexos se encuentran cada estructura de pavimento propuesta con el respectivo soporte de los valores arrojados por el software PitraPave.

Modelo de Agrietamiento por fatiga del Instituto del Asfalto

En la tabla 11 se evidencia el número de repeticiones para causar el agrietamiento por fatiga según el Instituto Norteamericano del Asfalto, partiendo de que se obtuvieron los valores de:

$$C = 1.227$$

$$M = 0.089$$

Tabla 11 *Tránsito calculado por el modelo de agrietamiento por fatiga INA*

Número de repeticiones para causar el agrietamiento por fatiga NF						
ESPESOR	MDC 19			MDC GCR		
	CBR			CBR		
	5	10	15	5	10	15
7.5	1.43.E+06	2.15.E+06	2.62.E+06	8.41.E+05	1.27.E+06	1.41.E+06
10	2.69.E+06	3.92.E+06	4.73.E+06	1.49.E+06	2.18.E+06	2.65.E+06
12.5	5.08.E+06	7.16.E+06	8.65.E+06	2.87.E+06	3.87.E+06	4.66.E+06

Fuente: elaboración propia

En la tabla 12 se muestran los valores de consumo calculados para los diferentes valores de CBR y diferentes espesores para ambas mezclas en estudio:

Tabla 12 *Consumo por fatiga, INA*

Consumo - fatiga INA						
ESPESOR	MDC 19			MDC GCR		
	CBR			CBR		
	5	10	15	5	10	15
7.5	350	232	191	594	393	354
10	186	127	106	335	229	189
12.5	98	70	58	174	129	107

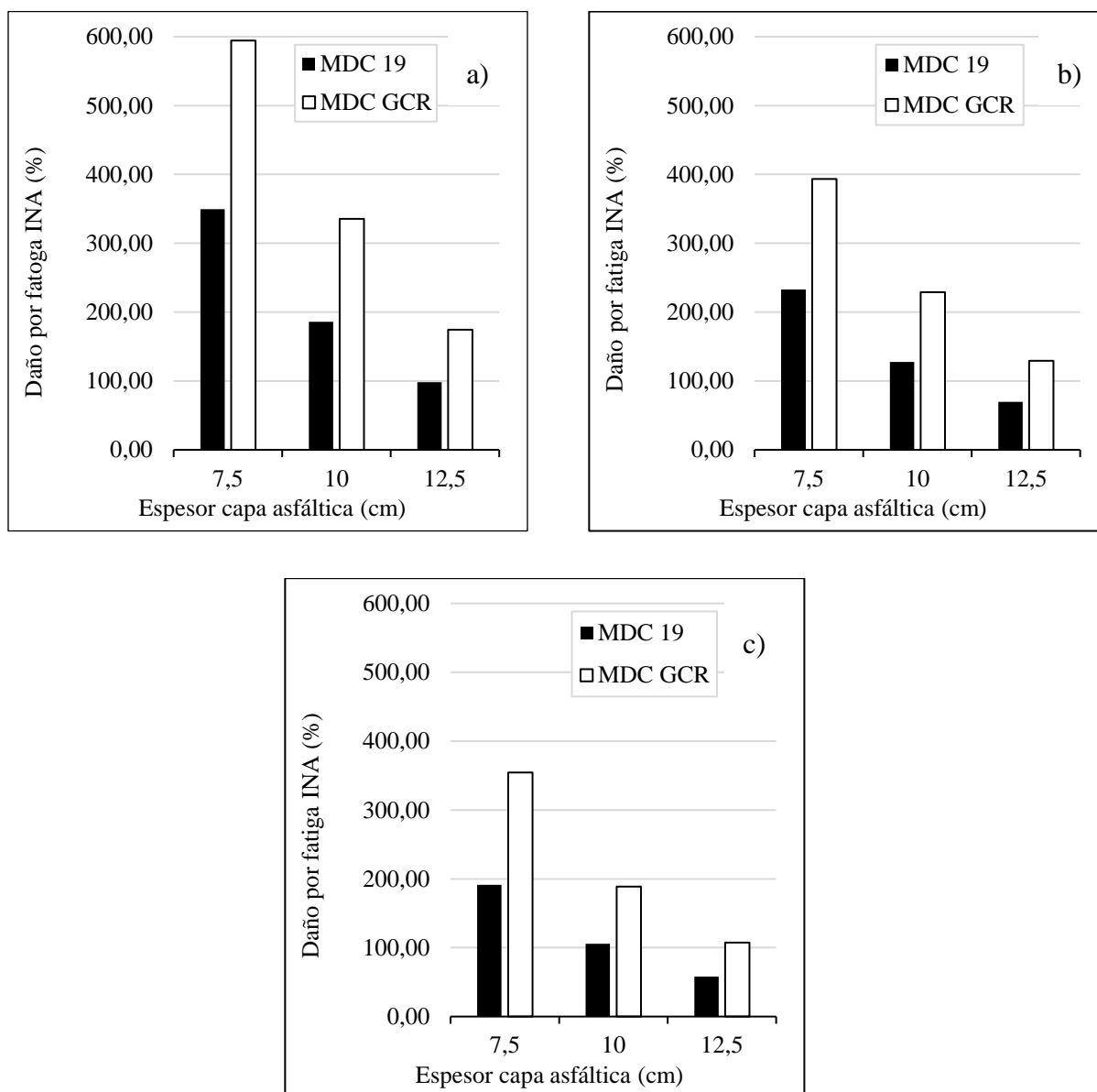
Fuente: elaboración propia

A continuación, en la figura 7 se representa gráficamente los consumos para los diferentes valores de CBR, espesores y módulos de mezclas. A medida que se aumenta el espesor el daño por fatiga va disminuyendo, cuando se aumenta el valor del CBR los daños disminuyen ya que la estructura del pavimento proporciona más rigidez y eso hace que el daño por fatiga sea menor, es decir el daño disminuye a medida que se aumenta la capacidad de la subrasante y a medida que se aumenta el espesor. Para estas condiciones de tránsito establecidas los valores de daño que cumplen son los de espesor 12.5 para todos los CBR con la mezcla MDC-19 ya que es menor del

100%.

Con respecto a la mezcla con incorporación de grano de caucho reciclado se observa que los valores son mayores debido a que el módulo es menor entonces el daño es mayor. Sin embargo, esta metodología no resulta confiable para este tipo de mezclas.

Figura. 7 Evolución del daño por fatiga con el espesor de la capa asfáltica: a) para CBR=5%; b) para CBR=10%; c) para CBR=15%



Fuente: elaboración propia

Modelo de Ahuellamiento del Instituto Norteamericano del Asfalto

En la tabla 13 se evidencia el número de repeticiones para causar ahuellamiento según el Instituto Norteamericano del Asfalto:

Tabla 13 *Tránsito calculado por el modelo de Ahuellamiento, INA*

Número De Repeticiones De Carga Por Eje Admisibles Para El Control Del Ahuellamiento Nz						
ESPESOR	MDC 19			MDC GCR		
	CBR			CBR		
	5	10	15	5	10	15
7,5	2,71,E+06	1,05,E+07	2,21,E+07	2,34,E+06	9,29,E+06	1,94,E+07
10	6,24,E+06	2,25,E+07	4,59,E+07	5,04,E+06	1,87,E+07	3,81,E+07
12,5	1,44,E+07	4,87,E+07	9,51,E+07	1,11,E+07	3,81,E+07	7,56,E+07

Fuente: elaboración propia

En la tabla 14 se muestran los valores de consumo calculados para los diferentes valores de CBR y distintos espesores para ambas mezclas en estudio:

Tabla 14 *Consumo por Ahuellamiento, INA*

Consumo - Ahuellamiento INA						
ESPESOR	MDC 19			MDC GCR		
	CBR			CBR		
	5	10	15	5	10	15
7,5	184,73	47,47	22,63	213,61	53,80	25,75
10	80,15	22,21	10,90	99,24	26,71	13,12
12,5	34,74	10,26	5,26	45,25	13,11	6,62

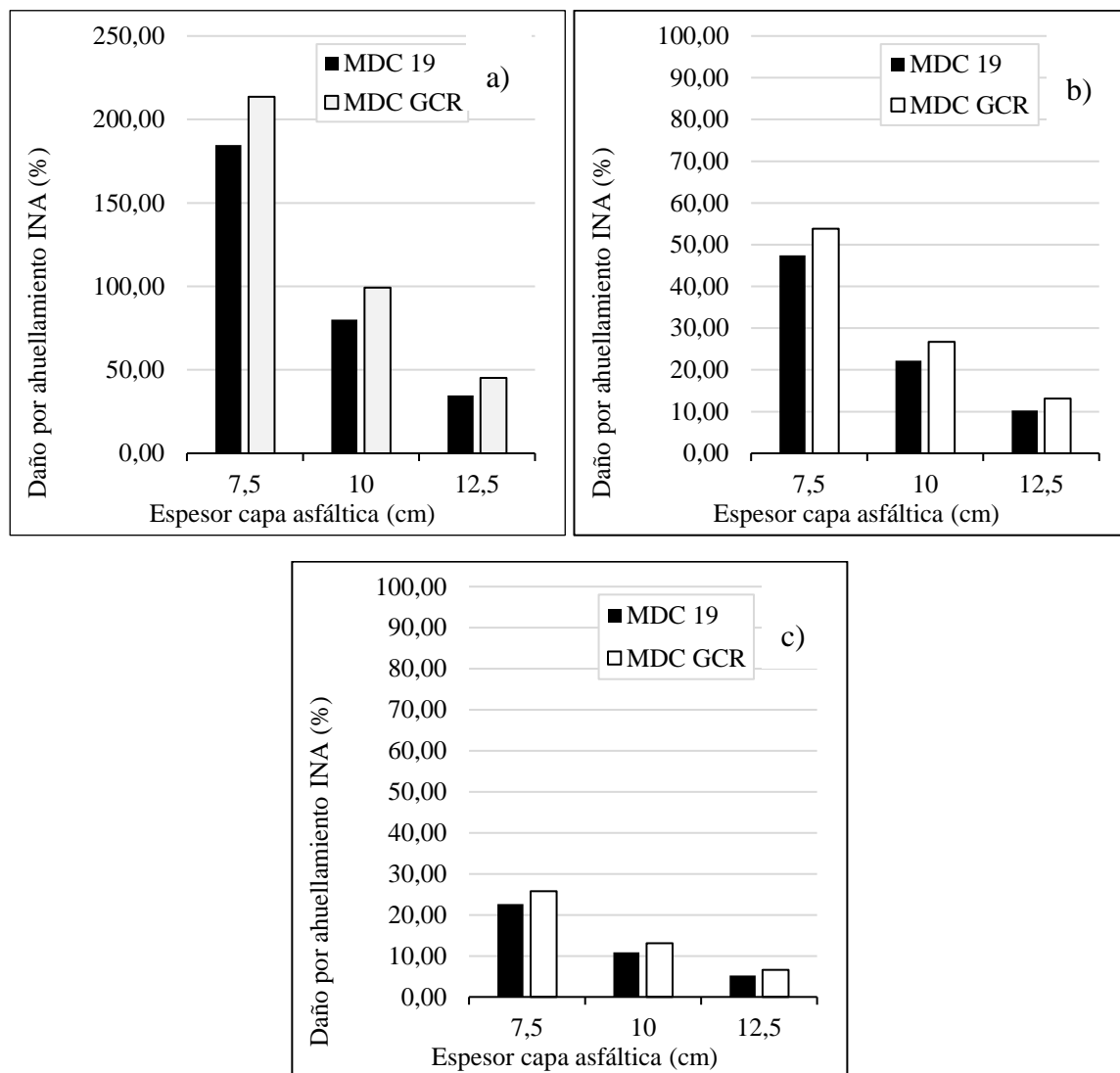
Fuente: elaboración propia

A continuación, en la figura 8 se representa gráficamente los consumos para los diferentes valores de CBR, espesores y módulos de mezclas. A medida que se aumenta el espesor el daño por fatiga va disminuyendo, cuando se aumenta el valor del CBR los daños disminuyen ya que la estructura del pavimento proporciona más rigidez y eso hace que el daño por fatiga sea menor, es

decir el daño disminuye a medida que se aumenta la capacidad de la subrasante y a medida que se aumenta el espesor. Para estas condiciones de tránsito establecidas los valores de daño que cumplen son los de espesor 12.5 para todos los CBR con la mezcla MDC-19 ya que es menor del 100%.

Los únicos valores que no superan el 100% del consumo son los correspondientes a la condición CBR 5% y 7,5 cm de espesor.

Figura. 8 Evolución del daño por Ahuellamiento con el espesor de la capa asfáltica: a) para CBR=5%; b) para CBR=10%; c) para BR=15%



Fuente: elaboración propia

Fatiga calculada a partir de ecuaciones de laboratorio obtenidas de la literatura

En la tabla 15 se evidencia el número de repeticiones para causar fatiga según ecuaciones de laboratorio obtenidas de la literatura:

Tabla 15 *Tránsito calculado a partir de ecuaciones obtenidas de laboratorio*

Número de repeticiones para causar fatiga, por ecuaciones de laboratorio						
ESPESOR	MDC 19			MDC GCR		
	CBR			CBR		
	5	10	15	5	10	15
7,5	2,E+05	3,E+05	4,E+05	9,E+04	2,E+05	2,E+05
10	4,E+05	7,E+05	9,E+05	2,E+05	4,E+05	5,E+05
12,5	1,E+06	2,E+06	2,E+06	6,E+05	9,E+05	1,E+06

Fuente: elaboración propia

En la tabla 16 se muestran los valores de consumo calculados para los diferentes valores de CBR y diferentes espesores para ambas mezclas en estudio:

Tabla 16 *Consumo fatiga, a partir de ecuaciones de laboratorio*

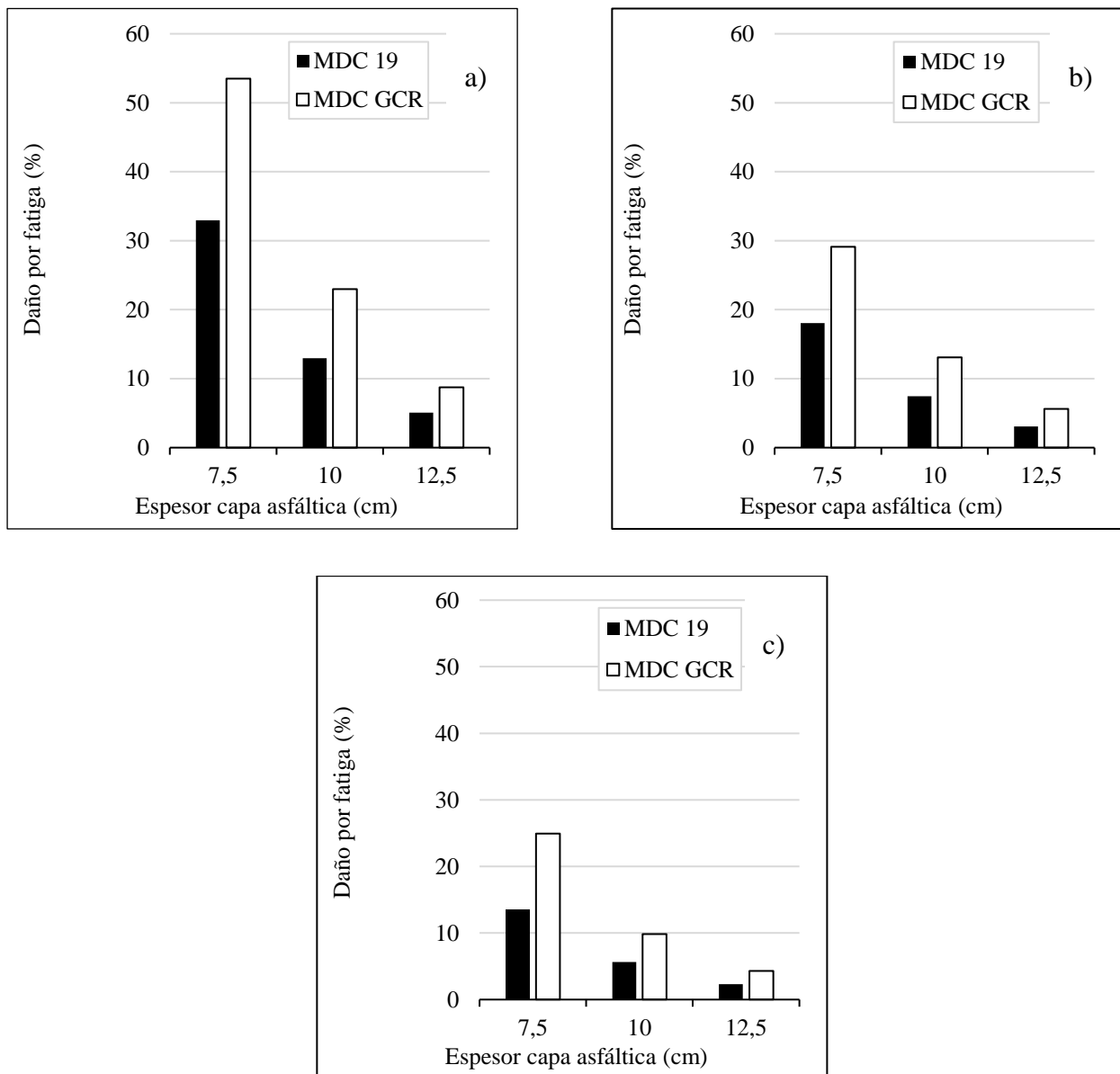
Consumo fatiga - Ecuaciones de laboratorio						
ESPESOR	MDC 19			MDC GCR		
	CBR			CBR		
	5	10	15	5	10	15
7,5	33,0	18,0	13,5	53,5	29,1	24,9
10	13,0	7,4	5,7	23,0	13,1	9,9
12,5	5,1	3,1	2,3	8,8	5,6	4,3

Fuente: elaboración propia

A continuación, en la figura 9 se representa gráficamente los consumos para los diferentes valores de CBR, espesores y módulos de mezclas. A medida que se aumenta el espesor el daño por fatiga va disminuyendo, cuando se aumenta el valor del CBR los daños disminuyen ya que la estructura del pavimento proporciona más rigidez y eso hace que el daño por fatiga sea menor, es

decir el daño disminuye a medida que se aumenta la capacidad de la subrasante y a medida que se aumenta el espesor. Para estas condiciones de tránsito establecidas los valores de daño que cumplen son los de espesor 12.5 para todos los CBR con la mezcla MDC-19 ya que es menor del 100%. Todos los valores de consumo obtenidos son menores del 100%, se evidencia que los daños con la mezcla asfáltica con incorporación de grano de caucho reciclado

Figura. 9 Evolución del daño por Fatiga con el espesor de la capa asfáltica: a) para CBR=5%; b) para CBR=10%; c) para CBR=15%



Fuente: elaboración propia

9.3 Análisis económico

Para este análisis se realizó una estimación de cuánto puede costar en precios actualizados un kilómetro de carretera con el espesor de carpeta asfáltica más alto, los valores de los materiales se muestran en la cotización adjunta en los anexos, el valor unitario de metro cubico compactado en obra sin administración, utilidades e imprevistos ya que esto depende de las condiciones contractuales de cada proyecto.

En la tabla 17 se evidencia que el valor de 1 Km de carretera es menor al costo de la misma estructura y mismas longitudes, pero utilizando mezcla asfáltica con incorporación de grano de caucho reciclado descrito en la tabla 18:

Tabla 17 *Costo de 1 Km de carretera con mezcla asfáltica MDC-19*

Precio para 1 km de vía de 7.0 m de calzada				
ÍTEM	ESPESOR (m)	M3	VR. UNIT	VR. TOTAL
CARPETA ASFÁLTICA MDC-19	0.125	875	\$ 372,750	\$ 326,156,250
BASE GRANULAR	0.200	1400	\$ 71,400	\$ 99,960,000
SUBBBASE GRANULAR	0.300	2100	\$ 50,575	\$ 106,207,000
				\$ 532,323,750

Fuente: elaboración propia

Tabla 18 *Costo de 1 Km de carretera con mezcla asfáltica MDC-GCR*

Precio para 1 km de vía de 7.0 m de calzada				
ÍTEM	ESPESOR (m)	M3	VR. UNIT	VR. TOTAL
CARPETA ASFÁLTICA MDC-GCR	0.125	875	\$ 560,800	\$ 490,700,000
BASE GRANULAR	0.200	1400	\$ 71,400	\$ 99,960,000
SUBBBASE GRANULAR	0.300	2100	\$ 50,575	\$ 106,207,000
				\$ 696,867,500

Fuente: elaboración propia

10. Conclusiones

A partir de la realización de la evaluación de deformaciones y consumos generados para las diferentes condiciones y estructuras de pavimento como los tres valores de CBR: 5, 10 y 15% para espesores de carpeta asfáltica de 7.5, 10.0 y 12.5 cm y espesores de 20 y 30 cm para base y subbase granular respectivamente con mezclas asfálticas MDC-GCR y MDC-19 y su respectivo análisis económico, es posible concluir que:

- ❖ La mezcla asfáltica MDC-19 presenta menores consumos tanto por fatiga y ahuellamiento para todas las condiciones analizadas con respecto a la mezcla asfáltica MDC-GCR, ya que como es visible al obtener las deformaciones mediante el software PitraPave las de la mezcla con grano de caucho reciclado son mayores que las de la MDC-19 que es más rígida y por ende las deformaciones son menores.
- ❖ Construir un pavimento con mezclas asfálticas con incorporación de grano de caucho reciclado es más costoso que la construcción de un pavimento con una capa de rodadura con mezclas asfálticas convencionales como la MDC-19, a pesar de que las capas de rodadura de mezclas asfálticas con grano de caucho reciclado incorporado se deforman más que las carpetas que son elaboradas con MDC-19 convencional, permiten dar un mejor valor de respuesta ante las solicitudes que puedan causar fatiga en la carpeta asfáltica.
- ❖ Las ecuaciones para estudiar los modelos de repeticiones admisibles para causar agrietamiento por fatiga del Instituto Norteamericano del Asfalto no son aplicables para módulos de mezclas asfálticas con incorporación de grano de caucho reciclado, ya que los consumos calculados para cada deformación superan el 100%.
- ❖ Para las diferentes metodologías estudiadas los menores consumos se presentaron con las ecuaciones obtenidas de laboratorio de la literatura, los valores son bajos en relación con el

modelo del Instituto Norteamericano del Asfalto para Ahuellamiento que son valores que oscilan entre 40 y 80% y para fatiga superan en su mayoría el 90%.

- ❖ El modelo analizado mediante el software PitraPave es lineal elástico, se sugiere para investigaciones futuras tener fuentes de consulta de un software que permita analizar un modelo visco elasto plástico.

11. Anexos

ESTRUCTURA PROPUESTA 1 (CBR = 5%) MDC-19						
Esp. (cm)	CAPA	E (MPa)	μ	Z (m)	DEFORMACIÓN	
7.5	CARPETA ASFÁLTICA	6762	0.35	0.074	1.97.E-04	Tracción
20	BASE GRANULAR	279	0.40			
30	SUBBASE GRANULAR	111	0.45			
	SUBRASANTE	49	0.50	0.576	3.82.E-04	Compresión
<div> Esfuerzos Deformaciones Deflexiones </div>						
#	Exx (1)	Eyy (1)	Ezz (1)	Exy (1)	Exz (1)	Eyz (1)
1	-1,3445e-04	-1,9706e-04	1,9509e-04	-1,5337e-20	-9,4122e-06	1,1527e-21
2	-1,7867e-04	-2,0336e-04	3,8204e-04	-3,0232e-21	0,0000e+00	1,4546e-20

ESTRUCTURA PROPUESTA 2 (CBR = 5%) MDC-19						
Esp. (cm)	CAPA	E (MPa)	μ	Z (m)	DEF	
10	CARPETA ASFÁLTICA	6762	0.35	0.099	1.63.E-04	Tracción
20	BASE GRANULAR	279	0.40			
30	SUBBASE GRANULAR	111	0.45			
	SUBRASANTE	49	0.50	0.601	3.17.E-04	Compresión
<div> Esfuerzos Deformaciones Deflexiones </div>						
#	Exx (1)	Eyy (1)	Ezz (1)	Exy (1)	Exz (1)	Eyz (1)
1	-1,0963e-04	-1,6259e-04	1,5800e-04	-1,2970e-20	-8,2687e-06	1,0126e-21
2	-1,5038e-04	-1,6718e-04	3,1756e-04	-2,0582e-21	0,0000e+00	1,0934e-20

ESTRUCTURA PROPUESTA 3 (CBR = 5%) MDC-19						
Esp. (cm)	CAPA	E (MPa)	μ	Z (m)	DEF	
12.5	CARPETA ASFÁLTICA	6762	0.35	0.124	1.34.E-04	Tracción
20	BASE GRANULAR	279	0.40			
30	SUBBASE GRANULAR	111	0.45			
	SUBRASANTE	49	0.50	0.626	2.63.E-04	Compresión
<div> Esfuerzos Deformaciones Deflexiones </div>						
#	Exx (1)	Eyy (1)	Ezz (1)	Exy (1)	Exz (1)	Eyz (1)
1	-9,1661e-05	-1,3438e-04	1,3001e-04	-1,0464e-20	-6,8566e-06	8,3969e-22
2	-1,2548e-04	-1,3722e-04	2,6270e-04	-1,4375e-21	0,0000e+00	8,3069e-21

ESTRUCTURA PROPUESTA 4 (CBR = 10%) MDC-19						
Esp. (cm)	CAPA	E (MPa)	μ	Z (m)	DEF	
7.5	CARPETA ASFÁLTICA	6762	0.35	0.074	1.74.E-04	Tracción
20	BASE GRANULAR	337	0.40			
30	SUBBASE GRANULAR	148	0.45			
	SUBRASANTE	77	0.50	0.576	2.82.E-04	Compresión
Esfuerzos Deformaciones Deflexiones						
#	Exx (1)	Eyy (1)	Ezz (1)	Exy (1)	Exz (1)	Eyz (1)
1	-1,1998e-04	-1,7438e-04	1,7667e-04	-1,3326e-20	-8,8892e-06	1,0886e-21
2	-1,3129e-04	-1,5101e-04	2,8231e-04	-2,4155e-21	0,0000e+00	1,1227e-20

ESTRUCTURA PROPUESTA 5 (CBR = 10%) MDC-19						
Esp. (cm)	CAPA	E (MPa)	μ	Z (m)	DEF	
10	CARPETA ASFÁLTICA	6762	0.35	0.099	1.45.E-04	Tracción
20	BASE GRANULAR	337	0.40			
30	SUBBASE GRANULAR	148	0.45			
	SUBRASANTE	77	0.50	0.601	2.38.E-04	Compresión
Esfuerzos Deformaciones Deflexiones						
#	Exx (1)	Eyy (1)	Ezz (1)	Exy (1)	Exz (1)	Eyz (1)
1	-9,7617e-05	-1,4536e-04	1,4353e-04	-1,1694e-20	-8,1638e-06	9,9978e-22
2	-1,1218e-04	-1,2590e-04	2,3808e-04	-1,6800e-21	0,0000e+00	8,5897e-21

ESTRUCTURA PROPUESTA 6 (CBR = 10%) MDC-19						
Esp. (cm)	CAPA	E (MPa)	μ	Z (m)	DEF	
12.5	CARPETA ASFÁLTICA	6762	0.35	0.124	1.21.E-04	Tracción
20	BASE GRANULAR	337	0.40			
30	SUBBASE GRANULAR	148	0.45			
	SUBRASANTE	77	0.50	0.626	2.00.E-04	Compresión
Esfuerzos Deformaciones Deflexiones						
#	Exx (1)	Eyy (1)	Ezz (1)	Exy (1)	Exz (1)	Eyz (1)
1	-8,1379e-05	-1,2074e-04	1,1818e-04	-9,6395e-21	-6,9798e-06	8,5477e-22
2	-9,5304e-05	-1,0508e-04	2,0038e-04	-1,1970e-21	0,0000e+00	6,6455e-21

ESTRUCTURA PROPUESTA 7 (CBR = 15%) MDC-19						
Esp. (cm)	CAPA	E (MPa)	μ	Z (m)	DEF	
7.5	CARPETA ASFÁLTICA	6762	0.35	0.074	1.64.E-04	Tracción
20	BASE GRANULAR	370	0.40			
30	SUBBASE GRANULAR	172	0.45			
	SUBRASANTE	98	0.50	0.576	2.39.E-04	Compresión
Esfuerzos Deformaciones Deflexiones						
#	Exx (1)	Eyy (1)	Ezz (1)	Exy (1)	Exz (1)	Eyz (1)
1	-1,1349e-04	-1,6404e-04	1,6842e-04	-1,2381e-20	-8,5504e-06	1,0471e-21
2	-1,1103e-04	-1,2845e-04	2,3948e-04	-2,1337e-21	0,0000e+00	9,7444e-21

ESTRUCTURA PROPUESTA 8 (CBR = 15%) MDC-19						
Esp. (cm)	CAPA	E (MPa)	μ	Z (m)	DEF	
10	CARPETA ASFÁLTICA	6762	0.35	0.099	1.37.E-04	Tracción
20	BASE GRANULAR	370	0.40			
30	SUBBASE GRANULAR	172	0.45			
	SUBRASANTE	98	0.50	0.601	2.03.E-04	Compresión
Esfuerzos Deformaciones Deflexiones						
#	Exx (1)	Eyy (1)	Ezz (1)	Exy (1)	Exz (1)	Eyz (1)
1	-9,2136e-05	-1,3732e-04	1,3691e-04	-1,1066e-20	-8,0369e-06	9,8423e-22
2	-9,5601e-05	-1,0786e-04	2,0346e-04	-1,5009e-21	0,0000e+00	7,5232e-21

ESTRUCTURA PROPUESTA 9 (CBR = 15%) MDC-19						
Esp. (cm)	CAPA	E (MPa)	μ	Z (m)	DEF	
12.5	CARPETA ASFÁLTICA	6762	0.35	0.124	1.14.E-04	Tracción
20	BASE GRANULAR	370	0.40			
30	SUBBASE GRANULAR	172	0.45			
	SUBRASANTE	0	0.50	0.626	1.73.E-04	Compresión
Esfuerzos Deformaciones Deflexiones						
#	Exx (1)	Eyy (1)	Ezz (1)	Exy (1)	Exz (1)	Eyz (1)
1	-7,6675e-05	-1,1435e-04	1,1276e-04	-9,2268e-21	-6,9843e-06	8,5532e-22
2	-8,1863e-05	-9,0675e-05	1,7254e-04	-1,0791e-21	0,0000e+00	5,8671e-21

ESTRUCTURA PROPUESTA 10 (CBR = 5%) MDC-GCR						
Esp. (cm)	CAPA	E (MPa)	μ	Z (m)	DEF	
7.5	CARPETA ASFÁLTICA	5333	0.35	0.074	2.18.E-04	Tracción
20	BASE GRANULAR	279	0.40			
30	SUBBASE GRANULAR	111	0.45			
	SUBRASANTE	49	0.50	0.576	3.95.E-04	Compresión
Esfuerzos Deformaciones Deflexiones						
#	Exx (1)	Eyy (1)	Ezz (1)	Exy (1)	Exz (1)	Eyz (1)
1	-1,5033e-04	-2,1766e-04	2,2146e-04	-1,6493e-20	-1,2036e-05	1,4740e-21
2	-1,8403e-04	-2,1065e-04	3,9468e-04	-3,2592e-21	0,0000e+00	1,5344e-20

ESTRUCTURA PROPUESTA 11 (CBR = 5%) MDC-GCR						
Esp. (cm)	CAPA	E (MPa)	μ	Z (m)	DEF	
10	CARPETA ASFÁLTICA	5333	0.35	0.099	1.83.E-04	Tracción
20	BASE GRANULAR	279	0.40			
30	SUBBASE GRANULAR	111	0.45			
	SUBRASANTE	49	0.50	0.601	3.33.E-04	Compresión
Esfuerzos Deformaciones Deflexiones						
#	Exx (1)	Eyy (1)	Ezz (1)	Exy (1)	Exz (1)	Eyz (1)
1	-1,2340e-04	-1,8296e-04	1,8121e-04	-1,4587e-20	-1,1007e-05	1,3480e-21
2	-1,5700e-04	-1,7555e-04	3,3255e-04	-2,2707e-21	0,0000e+00	1,1750e-20

ESTRUCTURA PROPUESTA 12 (CBR = 5%) MDC-GCR						
Esp. (cm)	CAPA	E (MPa)	μ	Z (m)	DEF	
12.5	CARPETA ASFÁLTICA	5333	0.35	0.124	1.50.E-04	Tracción
20	BASE GRANULAR	279	0.40			
30	SUBBASE GRANULAR	111	0.45			
	SUBRASANTE	49	0.50	0.626	2.79.E-04	Compresión
Esfuerzos Deformaciones Deflexiones						
#	Exx (1)	Eyy (1)	Ezz (1)	Exy (1)	Exz (1)	Eyz (1)
1	-1,0350e-04	-1,5281e-04	1,4994e-04	-1,2079e-20	-9,3951e-06	1,1506e-21
2	-1,3309e-04	-1,4632e-04	2,7941e-04	-1,6196e-21	0,0000e+00	9,0889e-21

ESTRUCTURA PROPUESTA 13 (CBR = 10%) MDC-GCR						
Esp. (cm)	CAPA	E (MPa)	μ	Z (m)	DEF	
7.5	CARPETA ASFÁLTICA	5333	0.35	0.074	1.92.E-04	Tracción
20	BASE GRANULAR	337	0.40			
30	SUBBASE GRANULAR	148	0.45	0.576	2.90.E-04	Compresión
	SUBRASANTE	77	0.50			
Esfuerzos Deformaciones Deflexiones						
#	Exx (1)	Eyy (1)	Ezz (1)	Exy (1)	Exz (1)	Eyz (1)
1	-1,3422e-04	-1,9203e-04	2,0106e-04	-1,4159e-20	-1,1261e-05	1,3791e-21
2	-1,3467e-04	-1,5577e-04	2,9044e-04	-2,5845e-21	0,0000e+00	1,1776e-20

ESTRUCTURA PROPUESTA 14 (CBR = 10%) MDC-GCR						
Esp. (cm)	CAPA	E (MPa)	μ	Z (m)	DEF	
10	CARPETA ASFÁLTICA	5333	0.35	0.099	1.63.E-04	Tracción
20	BASE GRANULAR	337	0.40			
30	SUBBASE GRANULAR	148	0.45	0.601	2.48.E-04	Compresión
	SUBRASANTE	77	0.50			
Esfuerzos Deformaciones Deflexiones						
#	Exx (1)	Eyy (1)	Ezz (1)	Exy (1)	Exz (1)	Eyz (1)
1	-1,0983e-04	-1,6292e-04	1,6484e-04	-1,3004e-20	-1,0758e-05	1,3175e-21
2	-1,1658e-04	-1,3161e-04	2,4819e-04	-1,8408e-21	0,0000e+00	9,1795e-21

ESTRUCTURA PROPUESTA 15 (CBR = 10%) MDC-GCR						
Esp. (cm)	CAPA	E (MPa)	μ	Z (m)	DEF	
12.5	CARPETA ASFÁLTICA	5333	0.35	0.124	1.37.E-04	Tracción
20	BASE GRANULAR	337	0.40			
30	SUBBASE GRANULAR	148	0.45	0.626	2.12.E-04	Compresión
	SUBRASANTE	77	0.50			
Esfuerzos Deformaciones Deflexiones						
#	Exx (1)	Eyy (1)	Ezz (1)	Exy (1)	Exz (1)	Eyz (1)
1	-9,1859e-05	-1,3688e-04	1,3652e-04	-1,1026e-20	-9,4771e-06	1,1606e-21
2	-1,0032e-04	-1,1123e-04	2,1155e-04	-1,3366e-21	0,0000e+00	7,2138e-21

ESTRUCTURA PROPUESTA 16 (CBR = 15%) MDC-GCR						
Esp. (cm)	CAPA	E (MPa)	μ	Z (m)	DEF	
7.5	CARPETA ASFÁLTICA	5333	0.35	0.074	1.86.E-04	Tracción
20	BASE GRANULAR	370	0.40			
30	SUBBASE GRANULAR	172	0.45			
	SUBRASANTE	98	0.50	0.576	2.46.E-04	Compresión
Esfuerzos Deformaciones Deflexiones						
#	Exx (1)	Eyy (1)	Ezz (1)	Exy (1)	Exz (1)	Eyz (1)
1	-1,3113e-04	-1,8606e-04	1,9708e-04	-1,3453e-20	-1,0694e-05	1,3096e-21
2	-1,1372e-04	-1,3230e-04	2,4602e-04	-2,2763e-21	0,0000e+00	1,0199e-20

ESTRUCTURA PROPUESTA 17 (CBR = 15%) MDC-GCR						
Esp. (cm)	CAPA	E (MPa)	μ	Z (m)	DEFORMACIÓN	
10	CARPETA ASFÁLTICA	5333	0.35	0.099	1.54.E-04	Tracción
20	BASE GRANULAR	370	0.40			
30	SUBBASE GRANULAR	172	0.45			
	SUBRASANTE	98	0.50	0.601	2.12.E-04	Compresión
Esfuerzos Deformaciones Deflexiones						
#	Exx (1)	Eyy (1)	Ezz (1)	Exy (1)	Exz (1)	Eyz (1)
1	-1,0367e-04	-1,5362e-04	1,5741e-04	-1,2233e-20	-1,0534e-05	1,2900e-21
2	-9,9133e-05	-1,1252e-04	2,1165e-04	-1,6389e-21	0,0000e+00	8,0181e-21

ESTRUCTURA PROPUESTA 18 (CBR = 15%) MDC-GCR						
Esp. (cm)	CAPA	E (MPa)	μ	Z (m)	DEFORMACIÓN	
12.5	CARPETA ASFÁLTICA	5333	0.35	0.124	1.29.E-04	Tracción
20	BASE GRANULAR	370	0.40			
30	SUBBASE GRANULAR	172	0.45			
	SUBRASANTE	98	0.50	0.626	1.82.E-04	Compresión
Esfuerzos Deformaciones Deflexiones						
#	Exx (1)	Eyy (1)	Ezz (1)	Exy (1)	Exz (1)	Eyz (1)
1	-8,6519e-05	-1,2939e-04	1,3037e-04	-1,0500e-20	-9,4369e-06	1,1557e-21
2	-8,5921e-05	-9,5725e-05	1,8165e-04	-1,2007e-21	0,0000e+00	6,3494e-21

Mosquera, 7 de Mayo de 2021

WC-264B-2021

SEÑORES:

ING. EDWIN SALAMANCA / ING. MANUEL OLUA

Cel. 314 225 55 16 / 304 552 77 83

Ciudad

MATERIAL	CANT	UNIDAD	PRECIO UNITARIO INCLUIDO IVA SOBRE U
Imprimación y/o Riego de Liga	1	m2	1.800
Suministro, transporte, extensión, nivelación, y compactación de Mezcla asfáltica MDC-19 Asf 60-70 e=5 cm	1	m3 compacto	372.750
Suministro, extensión, nivelación, y compactación de Mezcla asfáltica con GRANO DE CAUCHO	1	m3 compacto	560.800

SERVICIO DE TRANSPORTE MAQUINARIA	CANTIDAD	UNIDAD	PRECIO UNITARIO
Transporte de Equipos (1 Entrada y 1 Salida)	1	Global	3.000.000

CONDICIONES COMERCIALES

1. Forma Pago: Anticipado.
2. Sitio de entrega de la mezcla: Planta Incomineria
3. Esta oferta tendra validez por 15 días a partir de la fecha de envío de esta oferta. Una vez aceptada la oferta, el precio se mantendra hasta el envío de una nueva oferta. Estos precios podrán ser modificados según incrementos de insumos y precios de mercado. No habrá aumento mientras el Gobierno Nacional NO decreta alzas en los precios del Asfalto.
4. Stand by día: 50 m3 compactos de instalación / 500 m2 de imprimación
Valor m3 compacto para completar el stand by \$50.000 m3)
Valor m2 para completar el stand by \$1.800 m2)
5. La seguridad de los equipos durante el tiempo que se encuentren en obra son responsabilidad del contratante.
6. Es responsabilidad del contratante disponer de su comision topografica para hacer entrega de los niveles del area a intervenir, y posterior validacion por parte del personal de Incomineria.
7. Las actividades estan contempladas para ejecutar en HORARIO DIURNO
8. Esta oferta NO incluye el sello de la junta entre el pavimento nuevo con el pavimento ya existente.

CALIDAD DE PRODUCTO

El producto se entrega con todos los ensayos exigidos por la normatividad Colombiana, tanto para Agregados como para Mezclas.

RESPONSABILIDAD

INCOMINERIA S.A.S no asume ninguna responsabilidad por trabajos ejecutados por el Contratante o por terceros previos a la ejecución de la obra a contratar. La responsabilidad de INCOMINERIA S.A.S se limita al suministro de la mezcla asfáltica y a la ejecución de la obra contratada.

ING. WENDY CHAVES
Directora Comercial
Cel. 317 363 66 63
INCOMINERIA SAS

Mosquera, 7 de Mayo de 2021

WC-264-2021

SEÑORES:

ING. EDWIN SALAMANCA / ING. MANUEL OLUA

Cel. 314 225 55 16 / 304 552 77 83

Ciudad

Asunto : Cotización Suministro Granulares

MATERIAL	ESPECIFICACIÓN	PRECIOS ESPECIALES ANTES DE IVA m3 (G)	IVA	PRECIOS ESPECIALES CON IVA m3
SUB-BASE GRANULAR IDU SBG-C, SBG-B, SBG-A (SB-Gr2)	Especificaciones IDU 2011.	\$ 42.500	\$ 8.075	\$ 50.575
BASE GRANULAR IDU BG-C, BG-B (BG-Gr 2)	Especificaciones IDU 2011.	\$ 46.500	\$ 8.835	\$ 55.335
BASE GRANULAR IDU BG-A (BG-Gr 2)	Especificaciones IDU 2011.	\$ 60.000	\$ 11.400	\$ 71.400

TARIFA DE TRANSPORTE

Incomineria no hace transporte directamente, pero maneja terceros aliados.

CONDICIONES COMERCIALES

1. Forma Pago: Anticipado.
2. Vigencia de Precios: A partir de la fecha y hasta el envío de una nueva oferta.
3. Frecuencia de ensayos: establecida por Incomineria SAS
4. Los productos que estan marcados con * son producidos solo bajo pedido y están sujetos a la disponibilidad de planta.
5. Estos precios podrán ser modificados según incrementos de insumos y precios de mercado.
6. Para los materiales que tienen especificaciones particulares Incomineria, es importante que el cliente solicite antes de comenzar los despachos, los respectivos laboratorios de los materiales para que pueda revisar sus características y pueda validar si cumple con las especificaciones que requiere el cliente, ya que al ser especificaciones particulares NO se aceptaran ningun tipo de reclamaciones despues de despachados los materiales.

PROGRAMACION DE LOS MATERIALES

Se debe realizar una programacion semanal los días viernes de cada semana con lo tentativo a consumir en la siguiente semana. De igual forma se debe confirmar la programacion con 1 día de anticipacion antes de las 3:00 pm.

FORMA DE CARGUE DE LOS MATERIALES

Todos los carros seran cubicados antes de comenzar despachos. Dicho cubicaje se realiza en presencisa del conductor. Todos los materiales salen relacionados por el cubicaje acordado, a excepcion de los materiales tales como B-600, Sub bases Granulares, Bases Granulares y Triturados que salen relacionados por el peso que arroje nuestra bascula, sin embargo tambien seran cubicados para tener el registro correspondiente.

ING WENDY CHAVES
Directora Comercial
Cel. 317 363 66 63
INCOMINERIA SAS

Bibliografía

- Agudelo, M y Martínez, S. (2019). Estudio comparativo del envejecimiento a largo plazo de una mezcla con asfalto modificado con grano de caucho reciclado. *Universidad católica de Colombia*. Facultad de ingeniería civil. [en línea] disponible en <https://repository.ucatolica.edu.co/bitstream/10983/24074/1/PROYECTO%20DE%20GRADO%20ESPECIALIZACION%20EN%20INGENIERIA%20DE%20PAVIMENTOS.pdf>
- Alcaldía mayor de Bogotá (2005) Especificaciones técnicas generales de materiales y construcción para proyectos de infraestructura vial y de espacio público. Especificaciones IDU- ET- 2005. Capítulo 4. Subbases y bases. *Instituto de desarrollo urbano*. [en línea] disponible en <https://www.idu.gov.co/web/content/7570/ET-Cap4.pdf>
- Alcaldía mayor de Bogotá, (s.f.). Mezclas asfálticas en caliente con asfaltos modificados con caucho por vía húmeda. *Gestión estratégica*. [en línea] disponible en <https://www.idu.gov.co/web/content/7632/560-11.pdf>
- Cad Portal (s.f.). Esfuerzo y Deformación. [en línea] disponible en <https://www.3dcadportal.com/esfuerzo-y-deformacion.html>
- Carrizales, J. (2015). Asfalto modificado con material reciclado de llantas para su aplicación en pavimentos flexibles. Puno – Perú. *Universidad nacional del altiplano*. Facultad de ingeniería civil y arquitectura. [en línea] disponible en http://repositorio.unap.edu.pe/bitstream/handle/UNAP/1888/Carrizales_Apaza_Jose_%20Javier.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- Construmatica, (s.f.). Ensayo CBR. (California Bearing Ratio) [en línea] disponible en https://www.construmatica.com/construpedia/Ensayo_CBR
- CTU (s.f.). tipos de mezclas asfálticas. Invias. MDC- 19. [en línea] disponible en

<https://ctu.com.co/mezcla-asfaltica-mdc-19/>

- Delbono, H y Rebollo, O. (2017). Ahuellamiento en pavimentos asfálticos utilizando geosintéticos. *congreso ibero – latinoamericano del asfalto*, Medellín – Colombia. [en línea] disponible en <https://ria.utn.edu.ar/bitstream/handle/20.500.12272/2496/Ahuellamiento%20en%20pavimentos%20asf%C3%A1lticos%20utilizando%20geosint%C3%A9ticos.pdf?sequence=1>
- Delgado, H; Gómez, J y Flores, M. (2017). Propuesta de método de prueba de módulo dinámico en mezclas asfálticas para México. *Publicación Técnica No. 507* Sanfandila, Qro, 2017. Instituto mexicano de transporte, [en línea] disponible en <https://imt.mx/archivos/Publicaciones/PublicacionTecnica/pt507.pdf>
- Diaz y Castro (2017). Implementación del grano de caucho reciclado (GCR) Proveniente de llantas usadas para mejorar las mezclas Asfálticas y garantizar pavimentos sostenibles en Bogotá. *Universidad Santo Tomas*. [en línea] disponible en <http://ligante-asfaltico.blogspot.com/p/llantas-usadas-en-pavimentos.html>
- E-Asfalto (s.f.). Pavimentos. [en línea] disponible en <http://www.e-asfalto.com/pavimentos/pavimentos.htm>
- Espinoza y Voldoso (2014). Estudio de la técnica del reciclado con asfalto espumado en las carreteras la Oroya – Chicrin – Huanuco – Tingo María – Dv. Tocache y Conococha - Yanacancha. *Universidad Ricardo palma*. Facultad de ingeniería. [en línea] disponible en <https://docplayer.es/71681671-Estudio-de-la-tecnica-del-reciclado-con-asfalto-espumado-en-las-carreteras-la-oroya-chicrin-huanuco-tingo-maria-dv-tocache-y-conococha-yanacancha.html>
- Instituto Mexicano del Transporte (2000). Módulos de resiliencia en suelos finos y materiales

- granulares. Publicación Técnica No. 142. *Sanfandila, Qro. 2000*. ISSN 0188-7297 [en línea] disponible en <https://www.imt.mx/archivos/publicaciones/publicaciontecnica/pt142.pdf>
- Léxico (s.f). Definición de Asfalto. [en línea] disponible en <https://www.lexico.com/es/definicion/asfalto>
- Londoño, C y Álvarez, J. (2008). Manual de diseño de pavimentos para vías con bajos, medios y altos volúmenes de tránsito. *Instituto Colombiano de Productores de Cemento*. – Medellín : ICPC; 2008. 114 p. [en línea] disponible en <https://www.invias.gov.co/index.php/archivo-y-documentos/documentos-tecnicos/3807-manual-de-diseno-de-pavimentos-de-concreto-para-vias-con-bajos-medios-y-altos-volumenes-de-transito/file>
- Maldonado, J. (2018). Estado del conocimiento de las mezclas asfálticas modificadas con grano caucho reciclado (GCR) en Colombia. *Universidad militar nueva granada*. Facultad de ingeniería [en línea] disponible en <https://repository.unimilitar.edu.co/bitstream/handle/10654/20892/MaldonadoOsorioJonathan2018.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Ministerio de transporte y comunicación, (2013). Estudio de mantenimiento periódico de la carretera panamericana norte. *Tramo II: (km 736+600 - Km 886+600)*. Perú [en línea] disponible en http://gis.proviasnac.gob.pe/Expedientes/2013/EXP_PANNORTE/dvd1/TRAMO-II/ANEXOS/PAN.%20NORTE/Anexo%207.%20Mediciones%20rugosidad/PDF/Anexo%20A%20-%20Descripci%C3%B3n%20de%20Fallas.pdf
- Ponce, J. (2019). El Espectro de carga para validar la carga de tráfico acumulada calculado por la AASHTO-93. Lima – Perú. Universidad Ricardo Palma – Escuela Posgrado. [en línea] disponible en

- https://repositorio.urp.edu.pe/bitstream/handle/URP/2487/VIAL_T030_09500891_M%20%20%20PONCE%20FILIOS%20JOS%C3%89%20LUIS.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- Rondón, H; Molano, Y & Tenjo, A. (2012). Influencia de la Temperatura de Compactación Sobre la Resistencia Bajo Carga Monotónica de Mezclas Asfálticas Modificadas con Grano de Caucho Reciclado de Llantas. Artículo de Investigación. *Revista Tecnológicas No. 29, ISSN 0123-7799*, julio-diciembre de 2012, pp. 13-31 [en línea] disponible en <http://www.scielo.org.co/pdf/teclo/n29/n29a02.pdf>
- Rondón, H; Reyes, F; González, L y Vásquez, S. (2015). Ahuellamiento y fatiga en mezclas asfálticas. *Ecoediciones*. [en línea] disponible en <https://www.ecoediciones.com/wp-content/uploads/2015/08/Ahuellamiento-y-fatiga-en-mezclas-asf%C3%A1lticas.pdf>
- Salamanca J y Godoy, O. (2013). Diseño de la vía Timaná – Cosanza en pavimento flexible. *Universidad católica de Colombia*. Facultad de ingeniería. Bogota D.C. [en línea] disponible en <https://repository.ucatolica.edu.co/bitstream/10983/981/2/Dise%C2%A6o-de%20la%20v%C2%A1a%20Timan%C3%AD-Cosanza%20en%20pavimento%20flexible.pdf>
- Thenoux, G y Carrillo, H (s.f.). Análisis de casos de ahuellamiento en mezclas asfálticas chilenas. [en línea] disponible en http://www2.udec.cl/~provia/trabajos_pdf/16GmoThenouxAhuellamiento.pdf
- Torres, L. (2017). Manual de Diseño de Pavimentos Asfálticos para vías de medios y altos volúmenes de tránsito. [en línea] disponible en <https://pdfcoffee.com/manual-de-pavimentos-medios-y-altos-volumenes-agosto-2017pdf-2-pdf-free.html>
- WISE (s.f.). ¿Qué es una capa de rodadura?. Catálogo de secciones estructurales de pavimentos

para las carreteras de la República Mexicana, SCT. [en línea] disponible en

[https://blog.vise.com.mx/que-es-una-capa-de-](https://blog.vise.com.mx/que-es-una-capa-de-rodadura#:~:text=La%20capa%20de%20rodadura%20es,de%20agregados%20p%C3%A9treos%20y%20asfalto.&text=Entre%20las%20capas%20de%20rodadura,riego%20y%20el%20mortero%20asf%C3%A1ltico.)

[rodadura#:~:text=La%20capa%20de%20rodadura%20es,de%20agregados%20p%C3%A9treos%20y%20asfalto.&text=Entre%20las%20capas%20de%20rodadura,riego%20y%20el%20mortero%20asf%C3%A1ltico.](https://blog.vise.com.mx/que-es-una-capa-de-rodadura#:~:text=La%20capa%20de%20rodadura%20es,de%20agregados%20p%C3%A9treos%20y%20asfalto.&text=Entre%20las%20capas%20de%20rodadura,riego%20y%20el%20mortero%20asf%C3%A1ltico.)

Zúñiga, R (2015). Mezcla asfáltica en caliente. *Laboratorio nacional de vialidad*. Ministerio de obras públicas. [en línea] disponible en

<http://www.vialidad.cl/areasdevialidad/laboratorionacional/MaterialCursos/Mezclas%20Asf%C3%A1lticas.pdf>